



# **Evaluación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para mitigar los efectos de Inundaciones Pluviales en la cuenca Palogrande, ciudad de Manizales**

**Alejandro Pava Jiménez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Departamento de Ingeniería Civil  
Manizales, Colombia  
Octubre 2020



# **Evaluación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para mitigar los efectos de Inundaciones Pluviales en la cuenca Palogrande, ciudad de Manizales**

**Alejandro Pava Jiménez**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería-Recursos Hidráulicos**

Director (a):

Ph.D Jeannette Zambrano Nájera

Codirector (a):

MSc Diana Marcela Rey Valencia

Línea de Profundización

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Departamento de Ingeniería Civil  
Manizales, Colombia  
Octubre 2020



*A Dios por darme fuerza para avanzar, a mi  
Familia por el apoyo incondicional, a Susy por  
ser mi motor y mi motivación diaria, a mi  
Esposa por acompañarme y apoyarme.*



## **Agradecimientos**

A Dios porque me ha dado fuerza para seguir adelante mostrándome el camino correcto.

A mi esposa Diana Lorena e hija Susana, por tratar de entenderme y apoyarme en el tiempo que he estado ausente.

Agradezco a mis hermanas por estar pendientes de mí en cada momento.

Doy gracias a mi padre Gustavo y a mi madre Mariela por inculcarme sus valores y apoyarme incondicionalmente.

Agradezco mucho a la Profesora Jeannette Zambrano Nájera quien fue mi Directora y me apoyó siempre entendiendo mis dificultades con paciencia e interés total, orientándome de la mejor forma y compartiendo su gran conocimiento.

A la ingeniera Diana Marcela Rey Valencia, mi Co-Directora por apoyarme y compartir su conocimiento y experiencia en los temas del presente trabajo.

A la Universidad Nacional de Colombia, por su formación y por hacerme sentir orgulloso.

A mis amigos Cesar y Juan Felipe por estar pendientes de mi avance.

Al Ing. William Sepúlveda, Líder UZNI-Gensa por su apoyo desde el comienzo.

A GENSA SA ESP por su apoyo económico en mi especialización y maestría.





## Resumen

### **Evaluación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para mitigar los efectos de Inundaciones Pluviales en la cuenca Palogrande, ciudad de Manizales**

Las inundaciones pluviales representan un gran problema del siglo XXI ya que generan pérdidas de infraestructura, daños a las vías públicas, dificultades en el tráfico y en las formas más graves pérdidas de vidas humanas. Por estas razones, vienen siendo muy estudiadas en cuanto a su génesis y al planteamiento de soluciones. Un tipo de solución lo constituyen los Sistemas Urbanos de Drenajes Sostenibles o SUDS, los que buscan emular el ciclo hidrológico y aliviar los caudales derivados de las precipitaciones. Estos, sin embargo, han sido poco investigados en cuencas urbanas de alta y media montaña donde los problemas de inundación tienen otras dinámicas. Para el estudio de este tipo de problemas la Universidad Nacional ha instrumentado la cuenca urbana Palogrande la que se utilizó en este trabajo para probar los SUDS. Una de las tipologías que presenta mayores bondades a la hora de aplicarla en ciudades de alta montaña corresponde a los depósitos de lluvia, por no requerir áreas representativas para su implementación, ni interferir en procesos de infiltración de los suelos que conlleven a la presencia de deslizamientos en zonas susceptibles con altas pendientes. Se implementaron 5 opciones de barriles de lluvia de 500, 600, 1000, 1100 y 2000 litros, con el modelo hidrodinámico SWMM, con el fin de adelantar la evaluación hidráulica y conocer su capacidad para aliviar las escorrentías pluviales. Por otro lado y buscando mejorar los resultados obtenidos, se aplicó la alternativa de celdas de bioretención como solución complementaria ante las condiciones inicialmente planteadas para atenuar los caudales de inundación.

**Palabras clave:** (Cuenca urbana, inundaciones pluviales, SUDS, SWMM, depósitos de lluvia).

## **Abstract**

### **Evaluation of Sustainable Drainage Systems to mitigate the effects of Storm Floods in the Palogrande basin, city of Manizales**

Rain floods represent a great problem of the 21st century since they generate infrastructure losses, damage to public roads, traffic difficulties and, in the most serious forms, loss of human life. For these reasons, they have been highly studied in terms of their genesis and the approach to solutions. One type of solution is the Sustainable Urban Drainage Systems or SUDS, which seek to emulate the hydrological cycle and alleviate the flows derived from rainfall. These, however, have been little investigated in high and mid-mountain urban basins where flood problems have other dynamics. For the study of this type of problem, the National University has implemented the Palogrande urban basin, which was used in this work to test the SUDS. One of the typologies that has the greatest benefits when applying it in high mountain cities corresponds to rain deposits, since it does not require representative areas for its implementation, nor does it interfere with soil infiltration processes that lead to the presence of landslides. In susceptible areas with steep slopes. 5 options of rain barrels of 500, 600, 1000, 1100 and 2000 liters were implemented, with the SWMM hydrodynamic model, in order to advance the hydraulic evaluation and know its capacity to relieve rain runoff. On the other hand, and seeking to improve the results obtained, the alternative of bioretention cells was applied as a complementary solution according to the conditions set out to attenuate the flow rates.

**Keywords:** (Urban basin, storm flooding, SUDS, SWMM, rain deposits)

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>IX</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>X</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XVI</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes a nivel de ciudad .....	1
1.2 Problemática.....	4
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>7</b>
2.1 General.....	7
2.2 Específicos .....	7
<b>3. Marco teórico.....</b>	<b>9</b>
3.1 Sistemas Urbanos de Drenaje Urbano Sostenible – SUDS .....	9
3.1.1 Alcorques inundables.....	11
3.1.2 Tanques de almacenamiento .....	12
3.1.3 Cunetas verdes.....	13
3.1.4 Zonas o celdas de Bioretención .....	15
3.1.5 Zanjas de infiltración .....	16
3.1.6 Pavimentos porosos.....	17
3.1.7 Cuenca Seca de Drenaje Extendido (CSDE) .....	19
3.1.8 Techos verdes.....	20
3.1.9 Depósitos de lluvia .....	21
3.2 Ventajas y desventajas de los SUDS .....	25
3.3 Normatividad y marco legal de los SUDS aplicados para Colombia.....	27
3.4 Modelo hidrodinámico SWMM .....	29
3.4.1 Modelo conceptual en SWMM.....	30
3.4.2 Procesos Hidrológicos en SWMM .....	30
3.4.3 Cálculo hidráulico en SWMM .....	35
<b>4. Metodología.....</b>	<b>38</b>
4.1 Características y parámetros cuenca Palogrande para modelación con SWMM .....	38
4.1.1 Definición zona de estudio .....	38
4.1.2 Descripción zona de estudio .....	39
4.1.3 Modelo hidrodinámico .....	40

4.1.4	Calibración, análisis de sensibilidad y discretización.....	44
4.2	Recalibración y modelación cuenca Palogrande .....	46
4.2.1	Nueva discretización para recalibración de modelo .....	46
<b>5.</b>	<b>Resultados modelación hidrodinámica.....</b>	<b>48</b>
5.1	Identificación de subcuencas para modelación .....	48
5.2	Modelación sin SUDS.....	48
5.3	Modelación con SUDS .....	49
5.3.1	Identificación de zonas para evaluación de la aplicación de SUDS.....	49
5.3.2	Condiciones de zonas críticas para modelo antes de SUDS.....	52
5.3.3	Alternativas SUDS para implementar.....	53
5.3.4	Parámetros de alternativas seleccionadas.....	57
	Depósitos de lluvia para 5 opciones (opción 1 a 5) con una (1) unidad de barril por techo.....	57
	Depósitos de lluvia para 2 opciones complementarias (opción 6 y 7) con varias unidades de barril por techo.....	62
	Depósitos de lluvia con varias unidades de barriles por techo y celdas de bioretención (opción 8) .....	66
	Enfoques para evaluar depósitos de lluvia con varias unidades de barriles por techo y celdas de bioretención (opción 8) .....	70
5.3.5	Evaluación hidráulica de los SUDS para 5 opciones de barriles de lluvia aplicados en las zonas críticas.....	73
5.3.6	Evaluación hidráulica de los SUDS para las opciones 6 y 7.....	89
5.3.7	Evaluación hidráulica de los SUDS para la opción 8.....	101
<b>6.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>112</b>
6.1	Propuesta y definición de alternativas SUDS .....	112
6.2	Evaluación de alternativas SUDS mediante SWMM.....	113
6.2.1	Escenarios para evaluación de alternativas .....	113
	Escenario 1.....	113
	Escenario 2.....	114
	Escenario 3.....	114
6.2.2	Evaluación de tiempos y volúmenes .....	115
6.2.3	Elección mejor escenario y alternativa .....	115
6.3	Recomendaciones.....	116
	<b>Anexos:.....</b>	<b>117</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>119</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Cambios en los procesos hidrológicos antes y después del desarrollo urbano .....	5
<b>Figura 1-2:</b> Hidrograma de una cuenca con niveles de urbanización .....	6
<b>Figura 3-1:</b> Esquema de Alcorque Inundable.....	12
<b>Figura 3-2:</b> Tanque de almacenamiento subterráneo (Izquierda) y a nivel de rasante (Derecha). .....	13
<b>Figura 3-3:</b> Cuneta verde tipo básica (izquierda) y Húmeda, (derecha), .....	14
<b>Figura 3-4:</b> Cuneta verde seca .....	14
<b>Figura 3-5:</b> Esquema de zonas de bioretención.....	15
<b>Figura 3-6:</b> Esquema general de Zanja de infiltración .....	17
<b>Figura 3-7:</b> Pavimento poroso según esquemas y tipos de infiltración.....	19
<b>Figura 3-8:</b> Esquema de CSDE. ....	20
<b>Figura 3-9:</b> Esquema de techos verdes extensivos (izquierda) e intensivos (derecha). .	21
<b>Figura 3-10:</b> Alternativas de depósitos de lluvia: Barril de lluvia (arriba) cisterna (abajo). .....	22
<b>Figura 3-11:</b> Modelo conceptual de depósito aplica a SWMM, .....	35
<b>Figura 4-1.</b> Localización de la zona estudio, fuente propia. ....	39
<b>Figura 4-2:</b> Mapa de usos de suelo año 2005.....	41
<b>Figura 4-3:</b> Conductividad hidráulica y potencial de succión.....	43
<b>Figura 4-4:</b> Cuenca Palogrande con mayor discretización en zona alta.....	46
<b>Figura 4-5:</b> Hidrograma de salida en cuenca discretizada y cuenca inicialmente validada. ....	47
<b>Figura 5-1:</b> Subcuencas identificadas en la zona alta .....	48
<b>Figura 5-2:</b> Comportamiento hidráulico del modelo sin SUDS .....	49
<b>Figura 5-3:</b> Zonas identificadas para la evaluación de SUDS .....	50
<b>Figura 5-4:</b> Ubicación de celdas de bioretención dentro de las 4 zonas para la evaluación de SUDS .....	51
<b>Figura 5-5:</b> Parámetros e información requerida para el modelo hidrodinámico .....	54
<b>Figura 5-6:</b> Parámetros e información requerida para la alternativa de celdas de bioretención.....	56
<b>Figura 5-7:</b> Distribución de techos para determinar unidades de barriles de lluvia.....	60
<b>Figura 5-8:</b> Detalle de características en celdas de bioretención. Adaptado de (CASQA, 2017).....	67
<b>Figura 5-9:</b> Configuración inicial de los SUDS en primer enfoque .....	71

<b>Figura 5-10:</b> Configuración inicial de los SUDS en segundo enfoque.....	72
<b>Figura 5-11:</b> Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 1 .....	74
<b>Figura 5-12:</b> Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 2 .....	75
<b>Figura 5-13:</b> Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 3 .....	76
<b>Figura 5-14:</b> Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 4 .....	77
<b>Figura 5-15:</b> Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con barriles de lluvia y la simulación sin SUDS para la zona 1 .....	78
<b>Figura 5-16:</b> Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con barriles de lluvia y la simulación sin SUDS para la zona 2.....	79
<b>Figura 5-17:</b> Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con barriles de lluvia y la simulación sin SUDS para la zona 3.....	80
<b>Figura 5-18:</b> Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con barriles de lluvia y la simulación sin SUDS para la zona 4.....	81
<b>Figura 5-19:</b> Variación del tiempo de inundación entre las opciones de barriles de lluvia y la simulación sin SUDS para la zona 1 .....	82
<b>Figura 5-20:</b> Variación del tiempo de inundación entre las opciones de barriles de lluvia y la simulación sin SUDS para la zona 2 .....	83
<b>Figura 5-21:</b> Variación del tiempo de inundación entre las opciones de barriles de lluvia y la simulación sin SUDS zona 3 .....	84
<b>Figura 5-22:</b> Variación del tiempo de inundación entre las opciones de barriles de lluvia y la simulación sin SUDS zona 4 .....	85
<b>Figura 5-23:</b> Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 1 .....	90
<b>Figura 5-24:</b> Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 2 .....	91
<b>Figura 5-25:</b> Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 3 .....	92
<b>Figura 5-26:</b> Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 4 .....	93
<b>Figura 5-27:</b> Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con opción 6 y 7 y la simulación sin SUDS para la zona 1 .....	94
<b>Figura 5-28:</b> Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con opción 6 y 7 y la simulación sin SUDS para la zona 2 .....	95
<b>Figura 5-29:</b> Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con opción 6 y 7 y la simulación sin SUDS para la zona 3 .....	96
<b>Figura 5-30:</b> Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con opción 6 y 7 y la simulación sin SUDS para la zona 4 .....	97
<b>Figura 5-31:</b> Variación en porcentaje de caudales de inundación de la opción 8 con respecto a la simulación sin SUDS en zona 1 .....	102

---

<b>Figura 5-32:</b> Variación en porcentaje de caudales de inundación de la opción 8 con respecto a la simulación sin SUDS en zona 2 .....	103
<b>Figura 5-33:</b> Variación en porcentaje de caudales de inundación de la opción 8 con respecto a la simulación sin SUDS en zona 3 .....	104
<b>Figura 5-34:</b> Variación en porcentaje de caudales de inundación de la opción 8 con respecto a la simulación sin SUDS en zona 4 .....	105
<b>Figura 5-35:</b> Variación en porcentaje del volumen de inundación entre la simulación con opción 8 y la simulación sin SUDS para la zona 1 .....	106
<b>Figura 5-36:</b> Variación en porcentaje del volumen de inundación entre la simulación con opción 8 y la simulación sin SUDS para la zona 2.....	107
<b>Figura 5-37:</b> Variación en porcentaje del volumen de inundación entre la simulación con opción 8 y la simulación sin SUDS para la zona 3.....	108
<b>Figura 5-38:</b> Variación en porcentaje del volumen de inundación entre la simulación con opción 8 y la simulación sin SUDS para la zona 4.....	109

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 3-1:</b> Alternativas de SUDS según técnicas. ....	11
<b>Tabla 3-2:</b> Análisis de precios unitarios para la alternativa de celdas de bioretención. ...	16
<b>Tabla 3-3:</b> Análisis de precios unitarios para las opciones de barriles de lluvia. ....	23
<b>Tabla 3-4:</b> Algunas ventajas y desventajas SUDS según tipo de control .....	25
<b>Tabla 4-1:</b> Datos base para el modelo .....	40
<b>Tabla 4-2:</b> Valores del coeficiente de rugosidad para áreas permeables según el uso del suelo .....	42
<b>Tabla 4-3:</b> Valores del almacenamiento superficial para las áreas permeables e impermeables .....	42
<b>Tabla 4-4:</b> Eventos considerados para la calibración.....	45
<b>Tabla 5-1:</b> Condiciones hidráulicas de zonas críticas en la simulación sin SUDS .....	52
<b>Tabla 5-2:</b> Características barriles de lluvia para 5 opciones según capacidad.....	57
<b>Tabla 5-3:</b> Parámetros de barriles de lluvia para aplicación en SWMM .....	58
<b>Tabla 5-4:</b> Parámetros de subcuencas para la aplicación en SWMM .....	60
<b>Tabla 5-5:</b> Cantidad de techos según área .....	62
<b>Tabla 5-6:</b> Asignación de unidades de barriles según clasificación de techos por área ..	62
<b>Tabla 5-7:</b> Características para barril de 1000 litros con distribución en 2 niveles .....	63
<b>Tabla 5-8:</b> Características para barril de 2000 litros con distribución en 1 sólo nivel.....	64
<b>Tabla 5-9:</b> Unidades de barriles consideradas inicialmente y después según cantidad propuesta.....	64
<b>Tabla 5-10:</b> Unidades de barriles consideradas en opción 8.....	66
<b>Tabla 5-11:</b> Parámetros considerados para celdas de bioretención en opción 8.....	68
<b>Tabla 5-12:</b> Información de barriles y celdas de bioretención en opción 8 .....	69
<b>Tabla 5-13:</b> Relación de tiempos y volúmenes de inundación.....	86
<b>Tabla 5-14:</b> Relación de tiempos y volúmenes de inundación para las opciones 6 y 7 ...	98
<b>Tabla 5-15:</b> Relación de tiempos y volúmenes de inundación para las opción 8.....	110







# **1.Introducción**

El presente capítulo tiene como propósito mostrar un contexto de la relación entre el efecto de los procesos de urbanización en el ciclo hidrológico y las alternativas de drenaje urbano sostenible, aplicadas a las inundaciones de cuencas urbanas de alta pendiente, mediante modelaciones hidrodinámicas empleando las soluciones que mejor se adapten a las condiciones del área de estudio.

## **1.1 Antecedentes a nivel de ciudad**

Las inundaciones representan el fenómeno hidrológico de mayor impacto en la sociedad. Prueba de lo anterior se refleja en el 50% de los desastres naturales (no biológicos) que ocurren a nivel mundial. Para 2008 los fenómenos hidrológicos afectaron mundialmente a 44.9 millones de personas, con daños económicos valorados en 905 mil millones de US\$ (Baró Suarez et al., 2011).

Los eventos de inundación causan además inconvenientes en el desarrollo normal de las actividades de la comunidad, por lo que generan problemas de gestión pública y sobre costos para su atención y solución, ya que dichos impactos pueden ser daño parcial o total de infraestructuras urbanas (calles, puentes, etc.), afectación en el momento de la inundación del tráfico vehicular y días después hasta que no haya una intervención de las entidades encargadas, la pérdida o afectación parcial de bienes económicos de los pobladores (casas, locales comerciales, parqueaderos, vehículos, etc.) y por último y más grave las muertes ocasionadas por la inundaciones (Jha et al., 2012).

El problema de las inundaciones pluviales, en parte obedece al aumento de la población en las ciudades y la expansión urbana resultante, situaciones que han sido particularmente marcadas en América Latina y el Caribe. Por ejemplo, en Colombia, la población urbana

ha aumentado del 40% en 1951 al 78% en 2018, en el caso de la ciudad de Manizales entre 1964 y 1987 la población creció alrededor de un 40% (Agudelo R & Duque G, 2018).

Para el caso de la ciudad de Manizales, las inundaciones pluviales, no solo obedecen a la expansión urbana, sino también a las pendientes fuertes y cambios abruptos entre zonas con fuerte inclinación seguidas aguas abajo por zonas planas.

(Rey Valencia, 2019) adelantó el inventario de inundaciones pluviales en la ciudad de Manizales, encontrando 17 eventos ocurridos entre los años 1953 y 2016, información que fue usada posteriormente para identificar zonas críticas de la ciudad por inundaciones pluviales presentadas.

Según el panorama anterior, a nivel mundial, en países como Estados Unidos, Reino Unido, Australia, Canadá y Chile se han venido desarrollando alternativas que mitiguen las inundaciones pluviales, dentro de la planificación de las grandes ciudades. Es así, como los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (conocidos como SUDS) se vienen adelantando como soluciones a los efectos que generan las fuertes lluvias y los procesos de urbanización en áreas donde se ha incrementado la escorrentía superficial. Como tal, un enfoque multiescala y multicriterio se vuelve fundamental al identificar las oportunidades para la implementación de SUDS dentro de una ciudad (Jiménez Ariza et al., 2019).

En Colombia, se han venido desarrollando estudios e investigaciones para implementar alternativas ante los problemas de inundación pluvial. Para el caso de la ciudad de Bogotá, el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental CIIA en el año 2015, realizó la Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C., donde se busca determinar tanto las características técnicas y de desempeño de las diferentes tipologías y/o tecnologías de SUDS existentes a nivel nacional e internacional, así como identificar cuáles de ellas se ajustan a las condiciones de los sistemas de drenaje actual, a las condiciones ambientales, urbanas, socio-culturales y económicas del Distrito (CIIA, 2015).

Para el caso de la ciudad de Manizales, específicamente en la cuenca Palogrande, entre el año 2016 y 2019 Rey Valencia, adelantó el trabajo de investigación, titulado: "Propuesta

de sistema de drenaje urbano sostenible para cuencas de montaña con alta pendiente”, en el que identifica la cuenca Palogrande, como zona de estudio.

En dicho trabajo se utilizó una modelación hidrodinámica para simular el comportamiento hidráulico en la zona de estudio. Como modelo hidrodinámico se usó el SWMM - Storm Water Management Model, por ser un modelo versátil a la hora de adelantar modelaciones en drenajes urbanos, permitiendo emplear las aplicaciones hidrológicas e hidráulicas de forma amigable, cumpliendo con las exigencias de la normatividad vigente en cuanto al Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.

Las alternativas consideradas como soluciones de Drenaje Urbano Sostenible dentro de las modelaciones fueron: Techos verdes y depósitos de lluvia.

Como depósitos de lluvia, se aplicaron las alternativas de barriles de lluvia de capacidad 1.100 l y cisternas de capacidad de 10.000 l. los barriles de lluvia demostraron tener un mal desempeño, dado que no almacenan toda la escorrentía generada por los techos o cubiertas, siendo el almacenamiento mínimo, por otro lado, las cisternas simuladas de capacidad de 10.000 l presentaron un mejor desempeño. No obstante, en la modelación se mostró que, aunque disminuyen el caudal pico para algunos casos en 25% no logran una disminución importante de este. Además, sería necesario implementar más cisternas que techos para aumentar el almacenamiento y llegar al requisito de reducción de caudal pico. De manera que se puede aplicar para cuencas de altas pendientes, pero tiene un desempeño aceptable o mínimo. Los techos verdes presentan un buen desempeño de manera que en todos los casos se logró retener el flujo de salida, logrando almacenar toda la lluvia. Este SUDS demostró el mejor comportamiento en mitigar la inundación, logrando disminuciones superiores al 25% del caudal pico (requisito RAS) en la mayoría de los casos.

Como recomendación en el estudio de investigación adelantado por (Rey Valencia, 2019), se plantea continuar trabajando en SUDS de manera que se adapten a las condiciones limitantes de las ciudades de montaña, así como realizar una evaluación de costo de los SUDS a implementar para revisar su relación costo-beneficio.

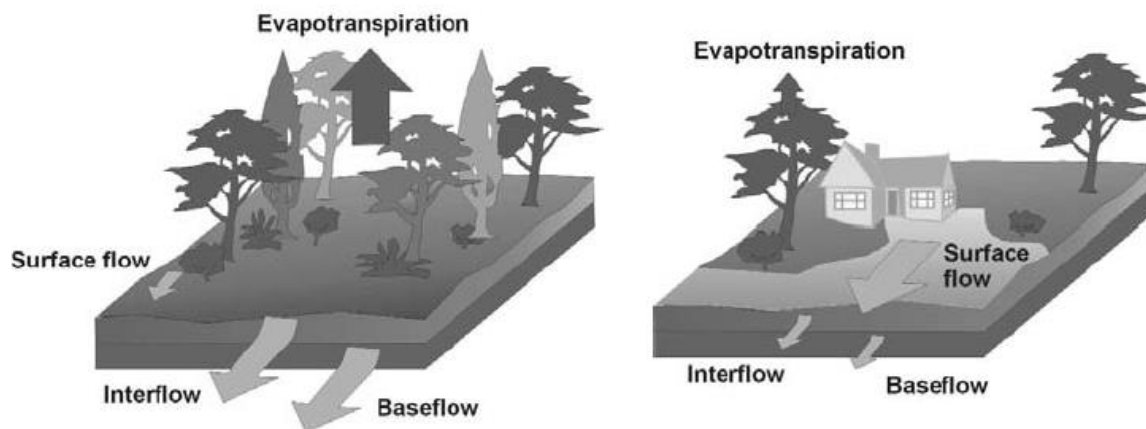
## 1.2 Problemática

El incremento de las inundaciones pluviales, se ha venido generando por los cambios en la hidrología de las cuencas urbanas, los cuales se deben principalmente al aumento de la población en los centros urbanos, lo anterior, viéndose reflejado en el crecimiento significativo del área impermeable, primordialmente por el cambio de uso del suelo, variando las condiciones y dinámicas naturales preexistentes.

Los procesos de urbanización generan transformación del ciclo hidrológico, donde la disminución o pérdida de cobertura vegetal, afecta de forma directa los procesos de interceptación, evapotranspiración y retención, lo cual, a su vez, genera impactos hidrológicos negativos a nivel urbano como: la reducción del potencial de infiltración de agua pluvial, los incrementos en los volúmenes y caudales pico de escorrentía, y el deterioro de la calidad de cuerpos de agua receptores (Barbosa et al., 2012).

Con el desarrollo de áreas impermeables se elimina la vegetación natural que intercepta, retarda y devuelve la lluvia al aire a través de la evaporación y transpiración, durante este desarrollo, los suelos con vegetación que conforman la superficie natural son eliminados y reemplazados por capas de materiales compactadas alterando el proceso de absorción e infiltración. Como resultado de las alteraciones en los procesos mencionados, se genera la reducción en la cantidad de agua que puede infiltrarse en el suelo, aumentando significativamente la velocidad y volumen del agua que corre fuera de la superficie (Woods-Ballard et al., 2007).

En la Figura 1-1 se observan los principales cambios generados en los procesos hidrológicos a partir de los procesos de urbanización y desarrollo.



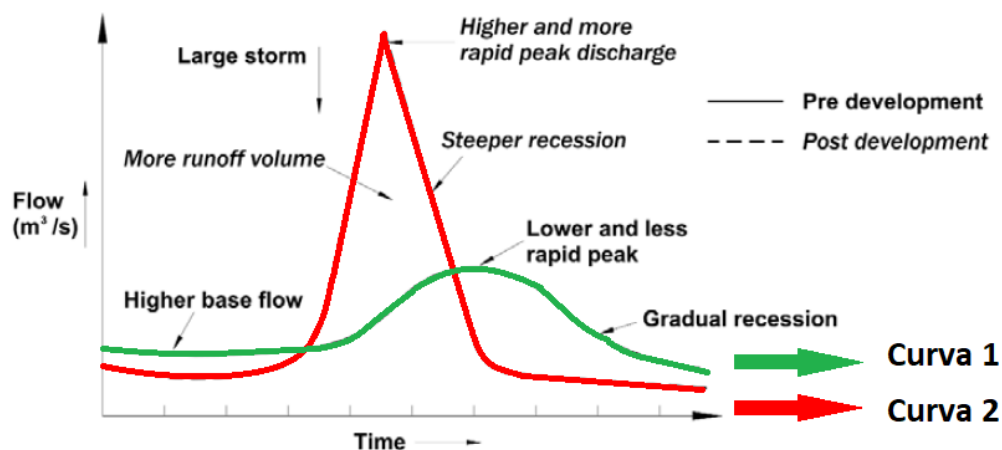
**Figura 1-1:** Cambios en los procesos hidrológicos antes y después del desarrollo urbano  
Fuente: (Woods-Ballard et al., 2007)

La reducción en la infiltración y el incremento de la escorrentía superficial son entre otros, resultados de las alteraciones en los procesos hidrológicos que contribuyen al aumento de las inundaciones pluviales, sumado a la corta duración de las intensas precipitaciones y las velocidades generadas por las altas pendientes en las cuencas de montaña.

Esta dinámica en los procesos hidrológicos de las cuencas urbanas de montaña, tiene como resultado adicional la afectación en el comportamiento de volúmenes de escorrentía y el caudal máximo, así mismo es menor el tiempo que transcurre entre el inicio de la escorrentía provocada por la lluvia y el máximo caudal disminuyendo de esta forma el tiempo de concentración.

De acuerdo con lo manifestado anteriormente y con el fin de mostrar una situación con poco nivel de urbanización, se presenta la Curva 1 en el hidrograma de la Figura 1-2, donde se observan unas condiciones permeables altas, lo que garantiza escenarios con procesos de alta infiltración y evapotranspiración, generando caudales bajos y tiempos retardados.

Por el contrario, y representando condiciones de baja permeabilidad, se muestra la Curva 2, donde se presenta el comportamiento de caudales pico más altos con tiempos de recorrido reducidos, generados por el incremento de escorrentía superficial a causa del proceso urbanización-impermeabilización.



**Figura 1-2:** Hidrograma de una cuenca con niveles de urbanización  
Fuente: adaptado de (Woods-Ballard et al., 2007)

Teniendo presente lo anterior, las inundaciones pluviales obedecen al incremento del caudal de escorrentía en tiempos de recorrido cortos, superando los caudales de diseño considerados para las redes de alcantarillado.



## **2. Objetivos**

### **2.1 General**

- Proponer alternativas de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible, para atenuar los niveles de inundación pluvial en la zona de estudio.

### **2.2 Específicos**

- Definir alternativas de mitigación de inundaciones pluviales para cuencas urbanas con altas pendientes.
- Evaluar las alternativas propuestas mediante modelación hidrodinámica.
- Proponer aplicaciones reales a la solución planteada.



## **3. Marco teórico**

### **3.1 Sistemas Urbanos de Drenaje Urbano Sostenible – SUDS**

El desarrollo de la población, su crecimiento y concentración en áreas limitadas, ha ocasionado una alta urbanización del suelo natural, y por lo tanto su impermeabilización acelerada (Baker, 2009). Esto a su vez ha cambiado las dinámicas hidrológicas previas, modificando los balances naturales del ciclo del agua. La concepción del sistema de drenaje de las ciudades de occidente (Chocat et al., 2007), ha intentado manejar y redirigir los flujos naturales de escorrentía de áreas habitadas hacia cuerpos de agua externos, para de este modo reducir los riesgos que implica la acumulación de agua en áreas pobladas. Según lo anterior, la escorrentía se ha visualizado como una amenaza y un residuo a disponer, y no como una oportunidad o un recurso a manejar (Martínez Acosta, 2017).

En diferentes partes del mundo, se ha empezado a explorar e implementar una nueva perspectiva de drenaje a través de Sistemas Urbanos de Drenajes Sostenible (SUDS), demostrando un adecuado y sostenible manejo de la escorrentía a nivel urbano (Shaver et al., 2007). Los SUDS son alternativas complementarias de drenaje que tratan de manejar el volumen de escorrentía, además de mejorar la calidad de ésta y ofrecer beneficios adicionales al área urbana en donde se implementan este tipo de sistemas.

Las estructuras y/o tipologías de SUDS generalmente se diseñan para satisfacer dos objetivos fundamentales: (1) reducir los volúmenes de escorrentía que son descargados directamente a los cuerpos de agua receptores o al sistema de drenaje convencional luego de un evento de precipitación, minimizando a su vez impactos asociados a eventos de

inundación y (2) mejorar la calidad del agua pluvial durante su captación, detención, conducción, infiltración y/o retención. No obstante, con la implementación de estos sistemas se pueden alcanzar de manera simultánea objetivos como: mejorar la amenidad del área urbana, incrementar el urbanismo y paisajismo de la ciudad e incentivar el reuso de agua pluvial. Los SUDS pueden diseñarse para proyectos de diferentes escalas, desde una escala de control en la fuente hasta una de tipo regional (CIIA, 2015).

Entre las técnicas utilizadas se encuentran las siguientes (Woods-Ballard et al., 2007):

- Infiltración: realizada de manera que se disminuye la escorrentía aumentando la infiltración en el suelo subyacente, con lo cual se logra restaurar en parte el ciclo hidrológico. Esta se puede aplicar para aumentar la recarga de los acuíferos cuando no existe riesgo de contaminación.
- Atenuación: son técnicas que buscan el movimiento lento del flujo antes de ser transferido a la red o salida del sistema, de manera que se reduzca el caudal pico, extendiendo la duración de la escorrentía, pero conservando el volumen total. La aplicación se logra por medio de estructuras que almacenen el volumen o controlen la salida de este.
- Transporte: consiste en transferir la escorrentía superficial de un lugar a otro en redes que incluyan canales abiertos, conductos y zanjas; es necesario controlar el transporte a los puntos donde serán descargados para que sea considerado como sostenible.
- Captura de la escorrentía: es la captura y uso de la escorrentía en el sitio donde se origina. Los volúmenes de agua captados pueden ser usados para fines domésticos o irrigación. Este tipo de soluciones deben ser diseñados para asegurar el control del almacenamiento de la escorrentía.

Para el desarrollo de las técnicas, se pueden implementar algunas de las alternativas presentadas en la Tabla 3-1, según su objetivo de aplicación:

**Tabla 3-1:** Alternativas de SUDS según técnicas.

Fuente: Adaptado de (Seco, 2018)

<b>Control de Inundación:</b>	<b>Control de contaminación (calidad):</b>
<p>Infiltración</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Zanjas de infiltración</li> <li>•Cunetas drenantes</li> <li>•Jardines</li> </ul> <p>Almacenamiento y laminación de caudales</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Techos verdes</li> <li>•Barriles de almacenamiento</li> <li>•Depósitos de retención (in-line y off-line)</li> <li>•Zonas o Celdas de bioretención</li> </ul> <p>Infiltración y almacenamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Pavimentos porosos</li> <li>•Pavimentos permeables (revestimiento alveolar)</li> </ul>	<p>Sedimentación y precipitación</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Barriles de almacenamiento</li> <li>•Depósitos de retención (in-line y off-line)</li> <li>•Estanques, reservorios y humedales</li> </ul> <p>Filtración/Biofiltración</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Techos verdes</li> <li>•Zonas o Celdas de bioretención</li> <li>•Pavimentos permeables</li> <li>•Zanjas de infiltración</li> </ul> <p>Absorción</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Pavimentos porosos y permeables</li> <li>•Cunetas “verdes” o drenantes</li> </ul> <p>Biodegradación</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Humedales</li> <li>•Celdas de bioretención</li> </ul>

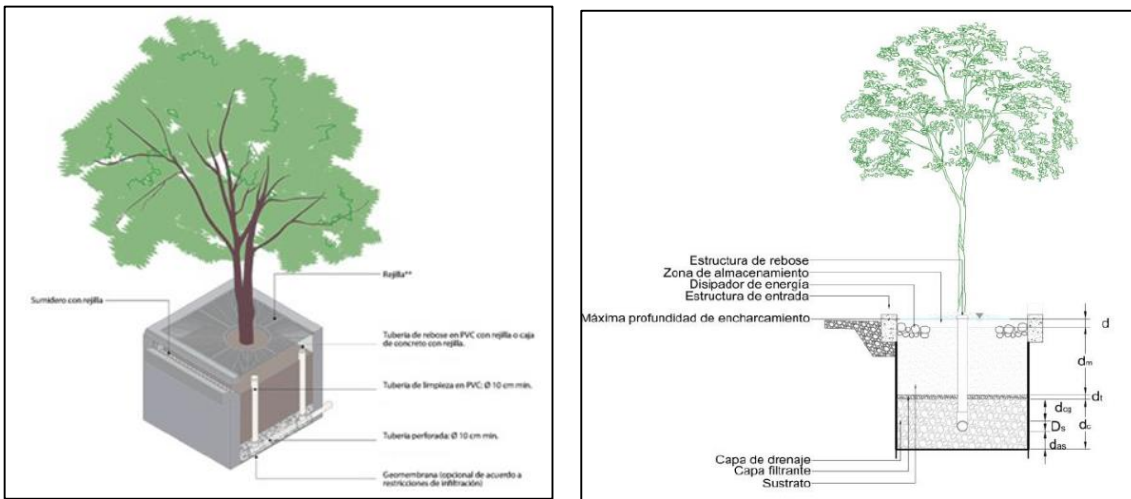
Con relación a las diferentes tipologías de SUDS existentes, cada una de éstas presenta características particulares y, por lo tanto, tienen que ser evaluadas de manera puntual, para obtener de forma adecuada los beneficios asociados a su implementación. A continuación, se presenta la descripción de algunas de las alternativas más recurrentes en áreas urbanas:

### 3.1.1 Alcorques inundables

Este sistema consiste en la construcción de una caja de concreto o instalación de elementos prefabricados para conformarla, pudiendo presentar fondo revestido en caso de no ser viable el proceso de infiltración. Cuenta con una tubería perforada a nivel sub-superficial que dirige la escorrentía fuera de la estructura cuando el volumen almacenado

no se puede infiltrar completamente, y una tubería de rebose, que evita que eventos de lluvia superiores al de diseño superen el nivel de encharcamiento permitido en la estructura. El material que conforma el lleno está compuesto de una mezcla de suelo formado por grava, arena y compost vegetal, que sirve de base para sembrar o replantar árboles de mediano tamaño, en el cual se almacena y detiene temporalmente el agua en los intersticios de su gradación, con el fin de permitir el tratamiento en el proceso de infiltración (EAAB, 2018; Martínez Acosta, 2017).

A continuación se muestra el esquema de los alcorques inundables en la Figura 3-1.

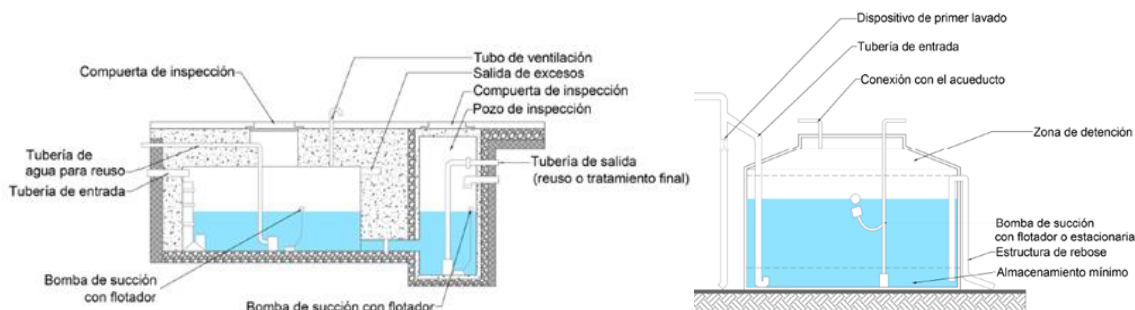


**Figura 3-1:** Esquema de Alcorque Inundable.  
Fuente: (EAAB, 2018; Medina Piza et al., 2018)

### 3.1.2 Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento son estructuras rígidas de forma prismática, que tienen la capacidad de almacenar el volumen de escorrentía generado después de un evento de lluvia, para luego darle uso doméstico o descargarlo de manera controlada al sistema de alcantarillado convencional. Dado que estos sistemas no cuentan con ningún tipo de lecho filtrante o mecanismo interno que mejore la calidad del agua, se requiere de estructuras de pre-tratamiento como dispositivos de primer lavado y/o rejillas, que reduzcan la carga contaminante del volumen de agua que se almacenará y prolonguen la frecuencia de operación y mantenimiento de estas estructuras (EAAB, 2018).

Los esquemas de tanques de almacenamiento se presentan en la Figura 3-2.



**Figura 3-2:** Tanque de almacenamiento subterráneo (Izquierda) y a nivel de rasante (Derecha).

Fuente: Adaptado de (EAB, 2018)

Según (Woods Ballard et al., 2015), dentro de los sistemas de almacenamiento que pueden cumplir funciones de atenuación, se tienen los siguientes:

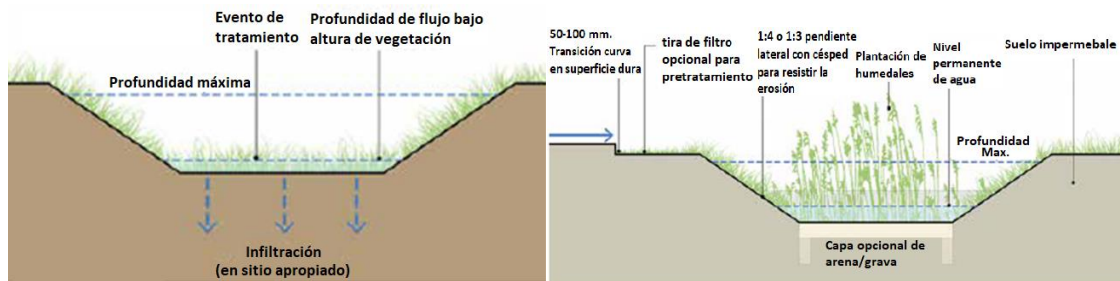
- Sistemas de almacenamiento geo-celular
- Estructuras de arco corrugado de plástico
- Tuberías de concreto sobredimensionadas
- Tuberías de plástico de gran tamaño
- Tubos de acero corrugado
- Secciones y tanques de alcantarillado de concreto prefabricado o in situ
- Tanques de plástico reforzado con vidrio (GRP)
- Estructuras híbridas con muros de tierra reforzada y paneles de techo de concreto.

### 3.1.3 Cunetas verdes

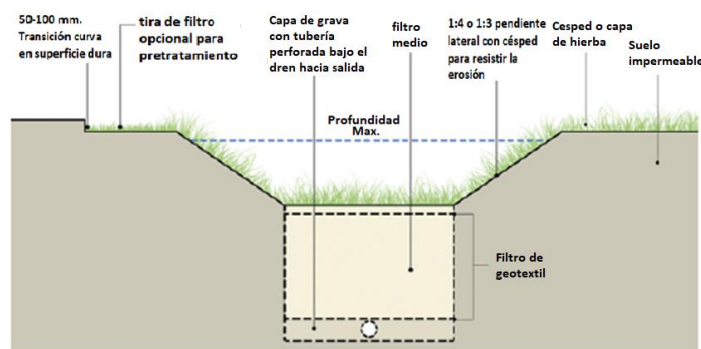
Las cunetas verdes son canales abiertos poco profundos, generalmente de fondo plano o curvo con vegetación, diseñados para transportar, tratar y a menudo atenuar la escorrentía de las aguas superficiales. Son a menudo usadas para drenar vías vehiculares o peatonales donde es conveniente recolectar, concentrar y transportar entradas de escorrentía mejorando los espacios abiertos (Woods Ballard et al., 2015).

Este sistema contribuye a la disminución de la velocidad de flujo, mediante su cobertura de pasto u otro tipo de vegetación, puede funcionar como filtro y facilitar la evapotranspiración de pequeñas cantidades de agua. Hidráulicamente permite transportar una lámina delgada de agua debido al uso de pendientes laterales y fondos planos en su sección transversal, asemejando pequeñas presas. Lo anterior incrementa la protección de los cuerpos de agua frente a eventos grandes de lluvia, gracias a la reducción de picos de escorrentía y liberación de caudales de agua a los sistemas de drenaje receptores o al mismo cuerpo directamente con una velocidad reducida (CIIA, 2015).

Las cunetas verdes pueden clasificarse en 3 tipos: Básica, Húmeda y Seca. Su configuración puede observarse en la Figura 3-3 y Figura 3-4.



**Figura 3-3:** Cuneta verde tipo básica (izquierda) y Húmeda, (derecha),  
Fuente: (Woods Ballard et al., 2015)



**Figura 3-4:** Cuneta verde seca  
Fuente: (Woods Ballard et al., 2015)



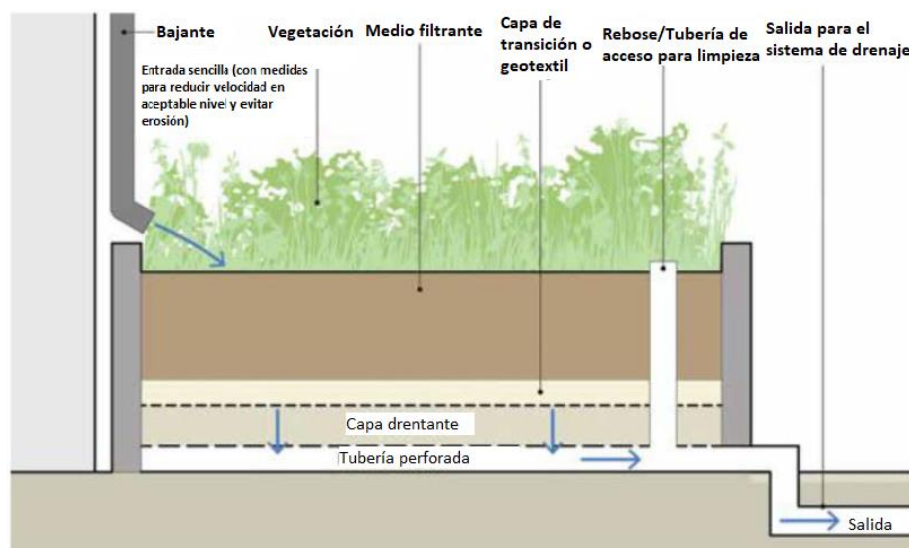
### 3.1.4 Zonas o celdas de Bioretención

Estas alternativas corresponden a depresiones superficiales ajardinadas poco profundas, diseñadas para atenuar y tratar la escorrentía mejorando paisajísticamente la zona donde se implemente. Consisten en una zona de acumulación de agua, una capa de suelo abonado, suelo de plantación y/o medio filtrante, donde se ubica también la zona radicular de las plantas (Woods Ballard et al., 2015).

Esta práctica permite la protección de cauces fluviales por erosión y contaminación, e incluso la eventual recarga de acuíferos por infiltración, generando además reducción de volúmenes de escorrentía gracias al almacenamiento temporal. (Louisiana Public Health Institute et al., 2010).

Adicionalmente, funciona como sistema de remoción de contaminantes, pudiendo además incorporarse fácilmente en zonas o proyectos viales, residenciales, comerciales e industriales (Toronto and Region Conservation Authority., 2010).

La Figura 3-5 presenta el esquema de zonas de bioretención.



**Figura 3-5:** Esquema de zonas de bioretención

Fuente: Adaptado de (Woods Ballard et al., 2015)(Louisiana Public Health Institute et al., 2010)

El sistema de Celdas de bioretención hace parte de las alternativas elegidas para evaluar la mitigación de las inundaciones en el presente trabajo. Para lo anterior, se plantea la

evaluación económica mediante el análisis de precios unitarios según las características de los elementos que componen esta opción.

En la Tabla 3-3 se presentan el análisis de precios unitarios, con precios del mercado actualizados al año 2020 **Tabla 3-3:** Análisis de precios unitarios para las opciones de barriles de lluvia.:

**Tabla 3-2:** Análisis de precios unitarios para la alternativa de celdas de bioretención.

ZONA DE BIORRETENCIÓN	[m2]					
DESCRIPCION	RENDIMIENTO	UND	PRECIO	MATERIAL	MANO DE OBRA	EQUIPOS
MANTILLO (MATERIAL SELECCIONADO COMPOST)	0.075	M3	40000	3000		
BANCO DE SUELO NATIVO	0.6	M3	75000	45000		
MATERIAL PERMEABLE (AGREGADO)	0.3	M3	75000	22500		
VIBROCOMPACTADOR GASOLINA	0.2	DIA	65000			13000
GEOTEXTIL NO TEJIDO 1600	1	M2	6200	6200		
ESTRUCTURA DE SOBRE FLUJO (TUBERÍA DE 3")	0.1	UN	25000	2500		
TUBERÍA PERFORADA PVC DE 4"	1	M	13000	13000		
CUADRILLA E (1OF+1AY)	0.33	JORNAL	146.151		48.717	
ACARREO HORIZONTAL(%MANO OBRA)	487.17	PESOS	1		487.17	
AGUA	20	LT	20	400		
HERRAMIENTA MENOR (2% MO)	974.34	PESOS	1			974.34
<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>155.779</b>			<b>92.600</b>	<b>49.204</b>	<b>13.974</b>

### 3.1.5 Zanjas de infiltración

Las zanjas de infiltración, consisten generalmente en zonas excavadas y conformadas, de sección rectangular, dispuestas con un material granular simulando un reservorio transitorio de agua. La escorrentía que ingresa a esta estructura es almacenada de forma temporal en los intersticios del material de lleno, para luego infiltrarse en el suelo circundante, a través del fondo de la zanja (Riverside County Flood Control and Water Conservation District, 2011).

Además de disminuir la escorrentía y reducir importantes picos de caudales mediante el proceso de infiltración, pueden mejorar la calidad del agua a través de procesos de

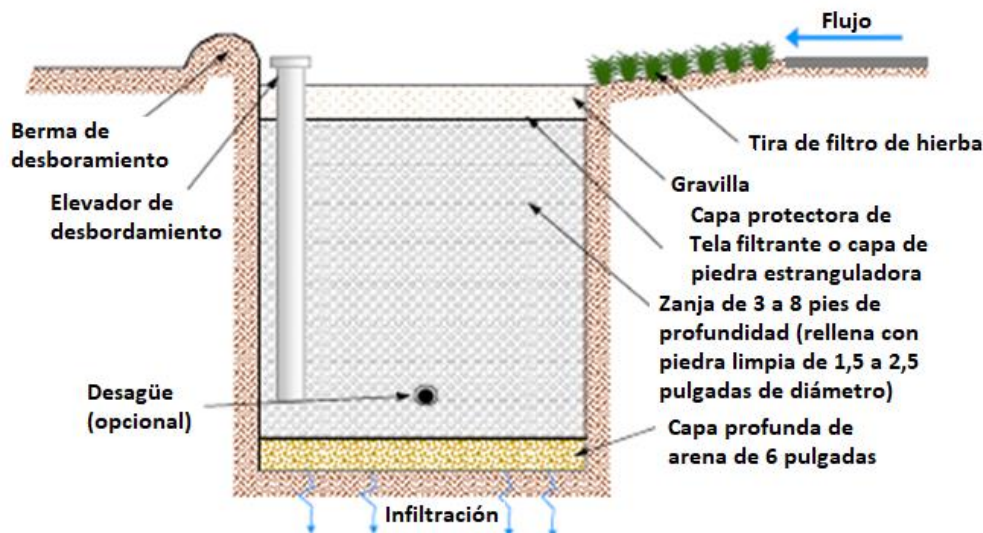
sedimentación y filtración de contaminantes en el medio granular, así como también la generación de recargas importantes de agua subterránea (Louisiana Public Health Institute et al., 2010).

En algunos casos se utilizan pequeñas coberturas vegetales con el fin de filtrar grandes cantidades de sedimentos, prevenir la colmatación del medio después de corto tiempo e incluso mejoramiento de apariencia (CIIA, 2015).

Según (CIIA, 2015) Pueden presentarse 3 tipos de zanjas de infiltración:

- Zanja de Infiltración Completa (captura total del volumen de escorrentía)
- Zanja de Infiltración Parcial (requiere instalar complementos hidráulicos de drenaje)
- Zanja de Infiltración Inicial (acumula la primera fracción del volumen de escorrentía con el fin de mejorar la calidad del agua).

En la Figura 3-6 se muestra el esquema general de Zanja de infiltración.



**Figura 3-6:** Esquema general de Zanja de infiltración  
Fuente: (Louisiana Public Health Institute et al., 2010)

### 3.1.6 Pavimentos porosos

Esta alternativa de drenaje corresponde a una estructura de pavimento donde la capa superficial generalmente de asfalto o concreto, permite la infiltración de agua, y

posteriormente es acumulada, filtrada y almacenada de forma temporal, en las capas inferiores. Este sistema se compone de cuatro capas muy bien definidas; la primera y más superficial es la capa de rodadura, la cual permite la infiltración de agua desde la superficie, posteriormente, se encuentra una capa de grava o arena que permite la disposición uniforme del agua. Más abajo, se localiza un filtro de geotextil que retiene sedimentos y contaminantes. Por último, se encuentra la capa granular de almacenamiento la cual retiene el agua temporalmente (CIIA, 2015).

Una característica que favorece los sistemas de pavimentos porosos es la baja pendiente, al igual que el bajo tráfico en las zonas donde se desarrolle esta alternativa, como parqueaderos, parques, senderos y ciclo-rutas, ya que una presión constante y significativa sobre la superficie de rodadura podría separar los intersticios y conglomerar el medio granular, limitando totalmente su capacidad de drenaje (Riverside County Flood Control and Water Conservation District, 2011).

Según (Woods Ballard et al., 2015), se pueden tener los siguientes criterios de clasificación:

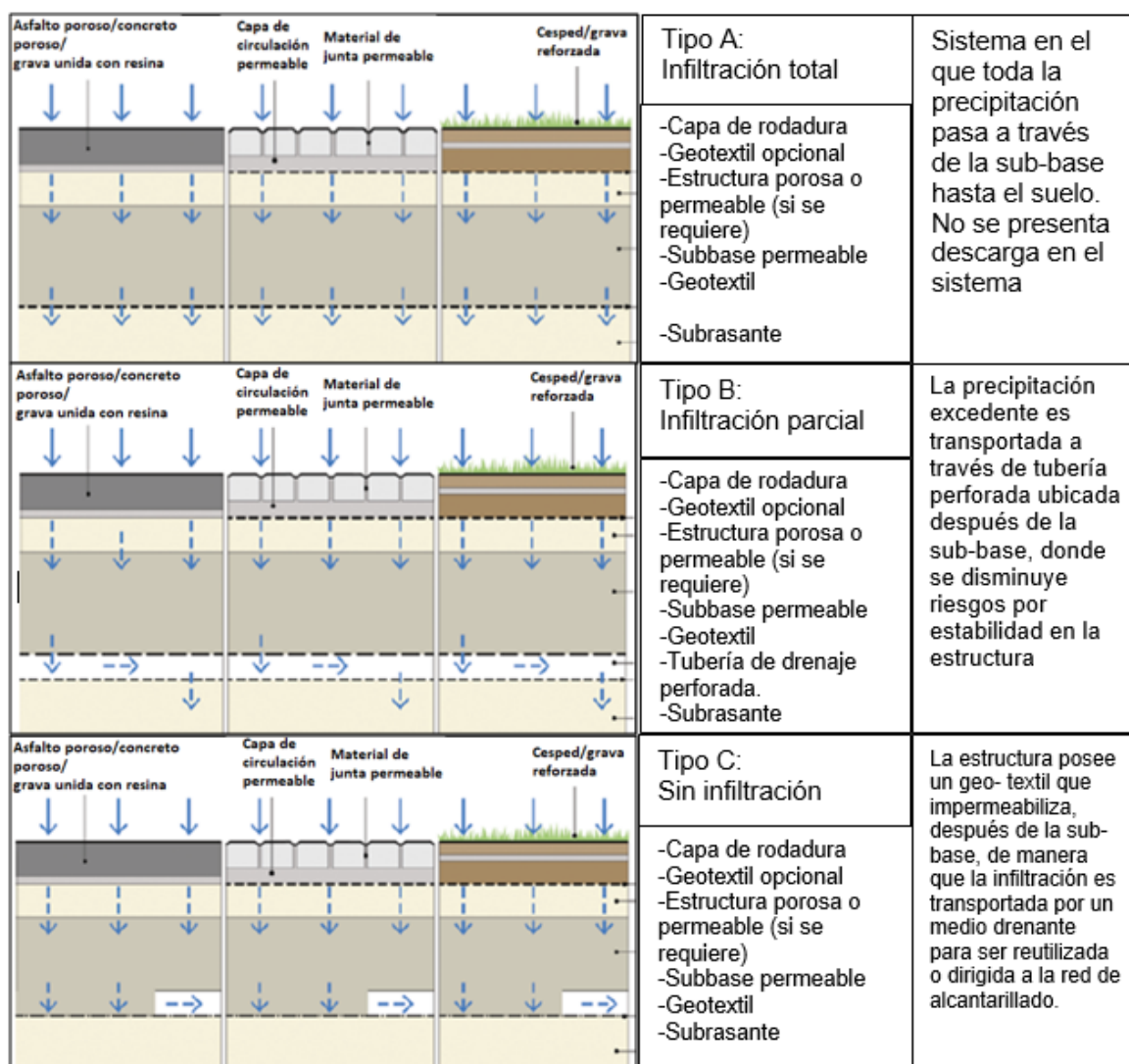
Según superficie utilizada como capa de rodadura:

- Pavimento permeable modular
- Asfalto poroso
- Refuerzo de cobertura vegetal
- Grava ligada a resina
- Concreto poroso
- Pavimento macro-permeable
- Superficies deportivas
- Bloque de pavimento poroso

Según la infiltración que se presente dentro de la estructura del pavimento:

- A: Infiltración Total
- B: Infiltración Parcial
- C: Sin infiltración.

En la Figura 3-7 se presentan los esquemas según la infiltración para los pavimentos porosos.



**Figura 3-7:** Pavimento poroso según esquemas y tipos de infiltración.

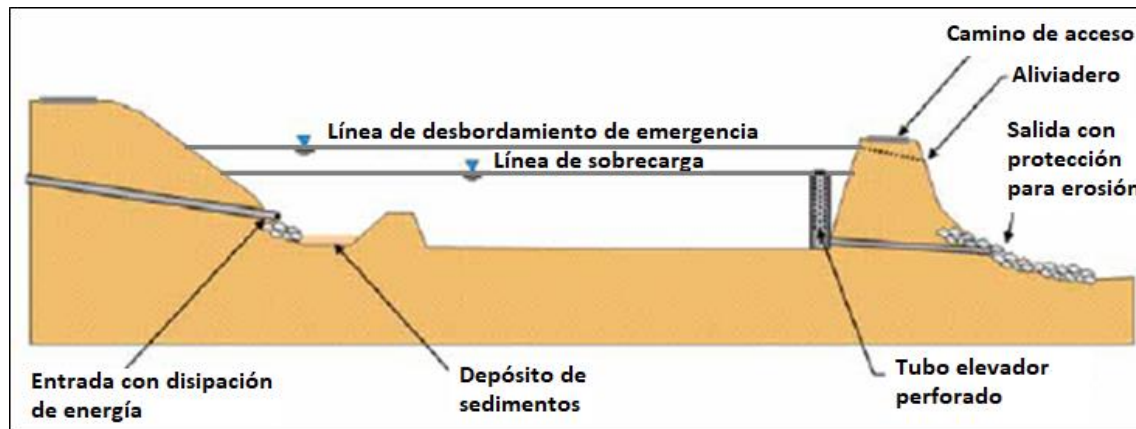
Fuente: adaptado de (Woods Ballard et al., 2015)

### 3.1.7 Cuenca Seca de Drenaje Extendido (CSDE)

Una cuenca Seca de Drenaje Extendido es un sistema que funciona como un reservorio almacenando temporalmente la escorrentía durante un tiempo determinado y lo descarga a través de una estructura de salida hidráulica a un sistema de transporte aguas abajo, a una tasa de infiltración controlada, bajo un tiempo específico y con una mejor calidad, promoviendo además pérdidas de volumen de escorrentía mediante procesos de

evaporación y evapotranspiración (Virginia Department Of Transportation, 2013; Riverside County Flood Control and Water Conservation District, 2011).

Esta tipología se diferencia de otras similares principalmente porque no están diseñadas específicamente para infiltrar, pues, aunque puede haber una cierta infiltración típica de una superficie permeable, el principal objetivo de este sistema es detener temporalmente un volumen de esorrentía. A continuación se presenta el esquema de CSDE en la Figura 3-8.



**Figura 3-8:** Esquema de CSDE.

Fuente: (Louisiana Public Health Institute et al., 2010).

### 3.1.8 Techos verdes

Los techos verdes son áreas de vegetación viva, instaladas en la parte superior de los edificios, que cumplen funciones como reducción de la esorrentía de aguas superficiales, mejora en la eficiencia energética, disminución de efectos de las islas de calor, beneficio visual (Toronto and Region Conservation Authority., 2010; Woods Ballard et al., 2015).

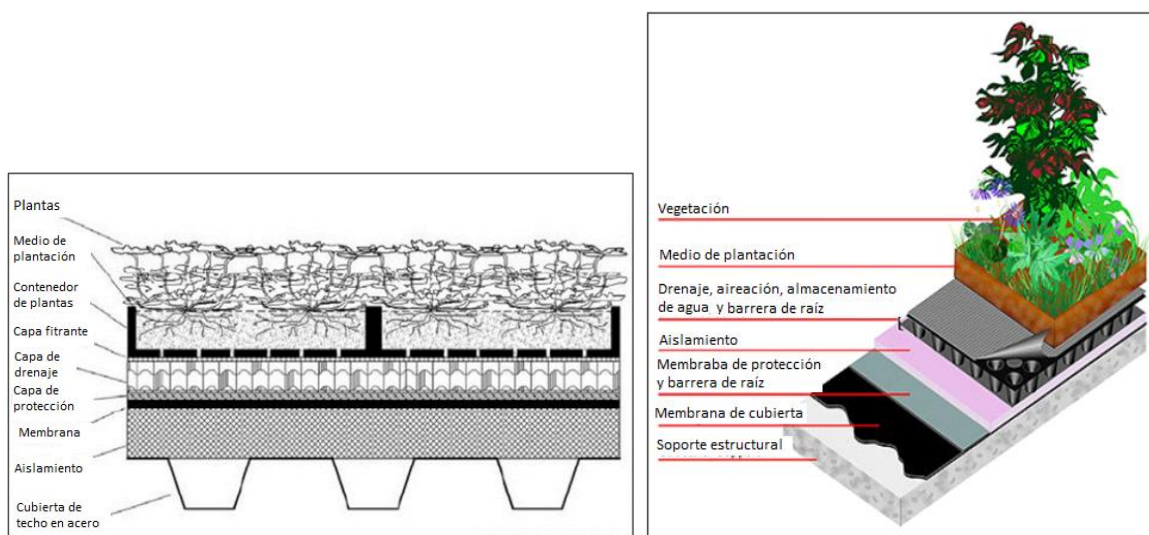
Los tipos de techo verde se pueden dividir principalmente en dos categorías:

- Techos extensivos, tienen bajas profundidades de sustrato y por lo tanto cargas bajas en la estructura del edificio, plantación simple y requisitos de bajo mantenimiento, generalmente no tienen accesibilidad.
- Los techos intensivos o jardines de techo tienen sustratos más profundos, por lo tanto cargas más altas en la estructura de soporte, debiendo resistir una amplia

variedad de plantación. Esta categoría requiere un mantenimiento más riguroso. Por lo general corresponden a zonas accesibles (Woods Ballard et al., 2015).

Otro tipo de diseño considerado dentro de esta alternativa corresponde a los Techos Azules, los cuales exclusivamente están destinados al almacenamiento del agua. Este sistema cumple funciones de atenuación, como almacenamiento para uso de riego, reducción de temperatura en días calurosos o uso doméstico no potable dentro de la edificación donde sea implementado (Woods Ballard et al., 2015).

En la Figura 3-9 se presenta el esquema de las dos categorías más comunes en la tipología de techos verdes:



**Figura 3-9:** Esquema de techos verdes extensivos (izquierda) e intensivos (derecha).  
Fuente: (Toronto and Region Conservation Authority., 2010)

### 3.1.9 Depósitos de lluvia

Los depósitos de lluvia corresponden a sistema de almacenamiento o contenedores que captan caudales de un evento de precipitación para posteriormente utilizarlos en riegos o usos domésticos donde no se requiera potabilización. El agua puede ser captada directamente de las cubiertas por medio de canaletas o bajantes de aguas lluvia que dirigen el agua a los depósitos, pasando generalmente a través de un filtro ubicado en su parte superior para evitar el ingreso de sólidos gruesos o insectos. Otra forma de usar los depósitos de lluvia corresponde a la captación directa de la escorrentía, dirigida mediante conducciones de tubería a un depósito de gran capacidad para luego conducirla mediante

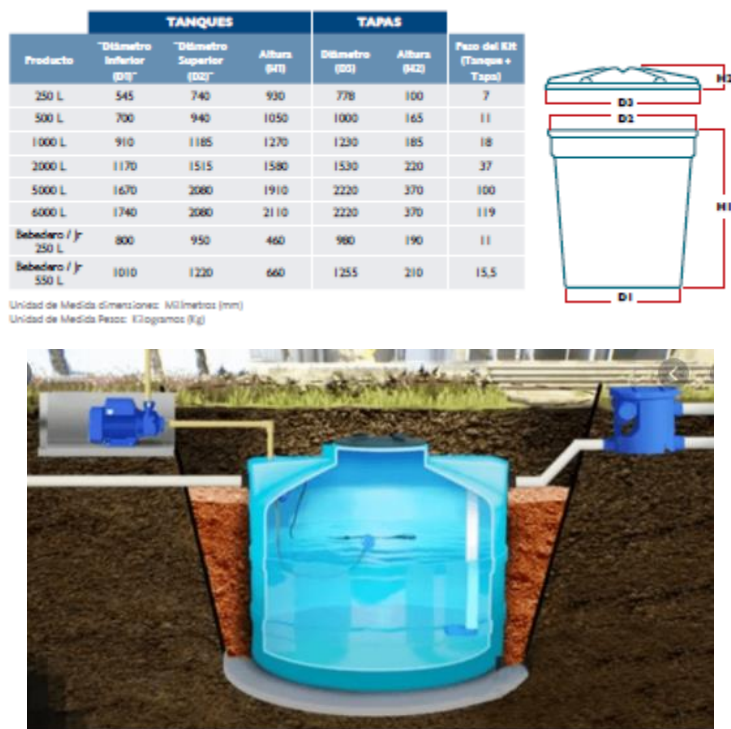


sistemas de bombeo a depósitos de menor capacidad ubicados en zonas más altas para utilizar el agua mediante gravedad.

Los depósitos se pueden clasificar por su capacidad de almacenamiento. Para bajas capacidades de almacenamiento se denominan barriles de lluvia, pueden contener desde 500 litros hasta 2000 litros. En el caso de depósitos con capacidad mayor a 2000 litros se denominan cisternas, cuya limitante es la disponibilidad de área requerida para su implementación.

Los depósitos de lluvia generalmente son fabricados de material plástico tipo polietileno de alta calidad, con el fin de garantizar productos livianos, resistentes y libres de elementos contaminantes, elaborados tecnológicamente para cuidar y proteger el agua, usando materias primas grado FDA (ETERNIT, 2016).

En la Figura 3-10 se pueden observar los barriles de lluvia o cisternas.



**Figura 3-10:** Alternativas de depósitos de lluvia: Barril de lluvia (arriba) cisterna (abajo).  
Fuente: (ACUAVIVA, 2019; Ragscorp, 2018)

Para el presente trabajo se consideraron diferentes opciones relacionadas con las alternativas que comercialmente pueden encontrarse. Para lo anterior, se plantea la evaluación económica mediante el análisis de precios unitarios según las diferentes capacidades de barriles de lluvia encontradas y las necesidades técnicas según las alternativas y escenarios evaluados.



En la Tabla 3-3 se presentan los análisis de precios unitarios con precios del mercado actualizados al año 2020 **Tabla 3-3:** Análisis de precios unitarios para las opciones de barriles de lluvia.:

**Tabla 3-3:** Análisis de precios unitarios para las opciones de barriles de lluvia.

<b>TANQUE CONICO 500 L</b>	<b>[Un]</b>					
DESCRIPCION	RENDIMIENTO	UND	PRECIO	MATERIAL	MANO DE OBRA	EQUIPOS
TANQUE AGUA 500 LT ACUAVIVA	1	UN	261.870	261.870		
ACCESORIOS PROMEDIO PVC 1/2-2"	10	UN	1.100	11.000		
LIMPIADOR PVC	0.0039	KG	62.502	244		
SOLDADURA PVC	0.0078	GAL	181.896	1.421		
TEFLON (CINTA)	1	UN	780	780		
CUADRILLA E (1OF+1AY)	0.25	JORNAL	146.151		36.538	
HERRAMIENTA MENOR (2% MO)	730.8	PESOS	1			731
CHEQUE 1/2 TOYO	1	UN	67.044	67.044		
REGISTRO RED WHITE 1/2	1	UN	48.852	48.852		
TUBERÍA PVC AGUA FRIA 1/2 RDE 21	2	M	3.929	7.857		
ACARREO HORIZONTAL(%MANO OBRA)	366.0	PESOS	1		366	
<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>436.702</b>			<b>399.068</b>	<b>36.904</b>	<b>731</b>

<b>TANQUE DE BOTELLA 600 L</b>	<b>[Un]</b>					
DESCRIPCION	RENDIMIENTO	UND	PRECIO	MATERIAL	MANO DE OBRA	EQUIPOS
TANQUE AGUA 600 LT COLEMPAQUES	1	UN	360.900	360.900		
ACCESORIOS PROMEDIO PVC 1/2-2"	10	UN	1.100	11.000		
LIMPIADOR PVC	0.0039	KG	62.502	244		
SOLDADURA PVC	0.0078	GAL	181.896	1.421		
TEFLON (CINTA)	1	UN	780	780		
CUADRILLA E (1OF+1AY)	0.25	JORNAL	146.151		36.538	
HERRAMIENTA MENOR (2% MO)	730.8	PESOS	1			731
CHEQUE 1/2 TOYO	1	UN	67.044	67.044		
REGISTRO RED WHITE 1/2	1	UN	48.852	48.852		
TUBERÍA PVC AGUA FRIA 1/2 RDE 21	2	M	3.929	7.857		
ACARREO HORIZONTAL(%MANO OBRA)	366.0	PESOS	1		366	
<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>535.732</b>			<b>498.098</b>	<b>36.904</b>	<b>731</b>

<b>TANQUE CONICO 1000 L</b>	<b>[Un]</b>					
DESCRIPCION	RENDIMIENTO	UND	PRECIO	MATERIAL	MANO DE OBRA	EQUIPOS
TANQUE AGUA 1000 LT ACUAVIVA	1	UN	339.300	339.300		
ACCESORIOS PROMEDIO PVC 1/2-2"	10	UN	1.100	11.000		
LIMPIADOR PVC	0.00391	KG	62.502	244		
SOLDADURA PVC	0.00781	GAL	181.896	1.421		
TEFLON (CINTA)	0.2	UN	780	156		
CUADRILLA E (1OF+1AY)	0.33	JORNAL	146.151		48.717	

HERRAMIENTA MENOR (2% MO)	730.8	PESOS	1			731
CHEQUE 1/2 TOYO	1	UN	67.044	67.044		
REGISTRO RED WHITE 1/2	1	UN	48.852	48.852		
TUBERÍA PVC AGUA FRIA 1/2 RDE 21	2	M	3.929	7.857		
ACARREO HORIZONTAL(%MANO OBRA)	487.0	PESOS	1		487	
<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>525.809</b>			<b>475.874</b>	<b>49.204</b>	<b>731</b>

<b>TANQUE DE BOTELLA 1100 L</b>	<b>[Un]</b>					
DESCRIPCION	RENDIMIENTO	UND	PRECIO	MATERIAL	MANO DE OBRA	EQUIPOS
TANQUE AGUA 1100 LT ROTOPLAST	1	UN	482.900	482.900		
ACCESORIOS PROMEDIO PVC 1/2-2"	10	UN	1.100	11.000		
LIMPIADOR PVC	0.00391	KG	62.502	244		
SOLDADURA PVC	0.00781	GAL	181.896	1.421		
TEFLON (CINTA)	0.2	UN	780	156		
CUADRILLA E (1OF+1AY)	0.33	JORNAL	146.151		48.717	
HERRAMIENTA MENOR (2% MO)	730.8	PESOS	1			731
CHEQUE 1/2 TOYO	1	UN	67.044	67.044		
REGISTRO RED WHITE 1/2	1	UN	48.852	48.852		
TUBERÍA PVC AGUA FRIA 1/2 RDE 21	2	M	3.929	7.857		
ACARREO HORIZONTAL(%MANO OBRA)	487.0	PESOS	1		487	
<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>669.409</b>			<b>619.474</b>	<b>49.204</b>	<b>731</b>

<b>TANQUE DE BOTELLA 2000 L</b>	<b>[Un]</b>					
DESCRIPCION	RENDIMIENTO	UND	PRECIO	MATERIAL	MANO DE OBRA	EQUIPOS
TANQUE AGUA 2000 LT ROTOPLAST	1	UN	910.000	910.000		
ACCESORIOS PROMEDIO PVC 1/2-2"	10	UN	1.100	11.000		
LIMPIADOR PVC	0.00391	KG	62.502	244		
SOLDADURA PVC	0.00781	GAL	181.896	1.421		
TEFLON (CINTA)	0.2	UN	780	156		
CUADRILLA E (1OF+1AY)	0.33	JORNAL	146.151		48.717	
HERRAMIENTA MENOR (2% MO)	730.8	PESOS	1			731
CHEQUE 1/2 TOYO	1	UN	67.044	67.044		
TUBERÍA PVC AGUA FRIA 1/2 RDE 21	1	UN	48.852	48.852		
TUB.PVC AF 1/2 RDE	2	M	3.929	7.857		
ACARREO HORIZONTAL(%MANO OBRA)	487.0	PESOS	1		487	
<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>1.096.509</b>			<b>1.046.574</b>	<b>49.204</b>	<b>731</b>

<b>ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA TANQUES DE 1000 L EN 2 NIVELES</b>	<b>[Un]</b>					
DESCRIPCION	RENDIMIENTO	UND	PRECIO	MATERIAL	MANO DE OBRA	EQUIPOS
PERFIL EN O METALICO C14 3"X2"	9.6	M	11000	105600		
PULIDORA	0.01563	DIA	41000			471
PLATINA DE APOYO PARA TUBO DE SOPORTE	4.0	UN	7500	30000		
ANDAMIO MODUL TRABA 1.2	0.15	DIA	1150			98
SOLDADURA WA-6013 3/32	0.16667	KG	10300	1716.7		
PINT ESMALTE	9.6	M	1200	11520		
LÁMINA ALFAJOR CAL 12	1.3	M	45000	58500		

CUADRILLA S (1SOLD+1AY)	0.3	JORNAL	150000		45000	
PLACA SOBRE PISO CONCRETO 0.1 m, Fc 210 Kg/cm2	1.3	M2	41000	53300		
HERRAMIENTA MENOR (2% MO)	900.0	PESOS	1			900
ACARREO HORIZONTAL(%MANO OBRA)	450.0	PESOS	1		450	
<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>307.556</b>			<b>260.637</b>	<b>45.450</b>	<b>1.469</b>

## 3.2 Ventajas y desventajas de los SUDS

Según el tipo de control y los procesos que puede cumplir cada alternativa, en la Tabla 3-4 se presenta un resumen con algunas ventajas y desventajas de los sistemas presentados anteriormente:

**Tabla 3-4:** Algunas ventajas y desventajas SUDS según tipo de control  
Fuente: elaboración propia

TIPO DE CONTROL	SISTEMA	PROCESO QUE REALIZA	VENTAJA	DESVENTAJA
Calidad	Alcorques inundables	Infiltración, transporte	Se puede implementar en áreas donde la infiltración debe estar restringida o eliminada.	No es un sistema recomendable para implementar si el área de drenaje es significativa o la pendiente es muy alta.
	Cunetas verdes	Infiltración, transporte, atenuación	Presenta fácil mantenimiento dada su baja profundidad y cómodo acceso.	En algunas ocasiones requieren de barreras de protección lateral, lo que representa unos costos elevados en su construcción
			Contribuye al mejoramiento urbanístico en el desarrollo de proyectos viales.	
			Es una alternativa que contribuye al control de la erosión en suelos donde se presenta este tipo de proceso.	
	Zonas de Bioretención	Atenuación, captura de escorrentía, infiltración	Presenta alta reducción de volumen de escorrentía.	Requiere un alto grado de mantenimiento
				No es apto para grandes áreas de drenaje
	Zanjas de Infiltración	Infiltración, transporte	Permite la eliminación de contaminantes antes del proceso de infiltración	
Inundación	Tanques de almacenamiento	Atenuación, captura de escorrentía.	Es una alternativa que genera economía al reemplazar el agua de la red de acueducto por agua lluvia para usos domésticos no potables.	En ocasiones hay limitación de espacios para su implementación en zonas de alta pendiente.

			Es un sistema sencillo y de bajos costos en instalación y mantenimiento	Requiere sistemas adicionales para su funcionamiento como sistemas de bombeo, filtración y tratamiento básico para potabilización.
			Es una buena opción para el control de Escorrentía	
			Es una Alternativa versátil que se adapta a diferentes condiciones, ya sea en sistemas que trabajan por gravedad o por bombeo	
	Pavimentos porosos	Atenuación, transporte, captura de escorrentía	Disminuyen áreas impermeables, sin requerir mayor extensión.	Necesitan mantenimiento desde la construcción para evitar que los sedimentos obstruyan los poros.
	Cuenca Seca de Drenaje Extendido (CSDE)	Atenuación, captura de escorrentía.	Es un sistema que permite el desarrollo de espacios de esparcimiento como zonas verdes para parques o escenarios deportivos.	En la etapa constructiva requiere un movimiento de tierra significativo.
			Presenta alta reducción de volumen de escorrentía	
	Techos verdes	Atenuación, captura de escorrentía.	Presenta un comportamiento satisfactorio en la reducción de caudales pico, atenuando los volúmenes en eventos de precipitación.	Es una alternativa costosa comparando su valor con los costos de una cubierta convencional.
			Como sistema de aislamiento térmico presenta buenos resultados, mitigando los efectos de isla de calor.	Requiere mantenimiento periódico y especializado
	Depósitos de lluvia	Atenuación, captura de escorrentía.	Alternativa que permite usar agua lluvia para usos domésticos no potables reemplazando el agua proveniente de la red de acueducto.	Limitación de espacios para su uso en zonas de alta pendiente.
			Sistema sencillo y de bajo costo en instalación y mantenimiento	En algunas ocasiones requiere sistemas adicionales para su funcionamiento como sistemas de bombeo, filtración y tratamiento
			Es una buena opción para el control de Escorrentía	
			Es una alternativa versátil que se adapta a diferentes condiciones, ya sea en sistemas que	

			trabajan por gravedad o por bombeo	
--	--	--	------------------------------------	--

### 3.3 Normatividad y marco legal de los SUDS aplicados para Colombia

Para la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, en la ciudad de Bogotá, se aprueba el Acuerdo 391 de 2009 (Concejo de Bogotá, 2009a), en donde se dictan lineamientos para la formulación del Plan Distrital de Mitigación y Adaptación al cambio climático y se dictan otras disposiciones creando una estrategia de gestión, planificación y control, con el objetivo de mejorar la calidad de vida y certificar el progreso sostenible de la ciudad.

Para el mismo año, el Concejo de la ciudad aprobó el Acuerdo 418 de 2009 (Concejo de Bogotá, 2009b) , por medio del cual se promueve la implementación de tecnologías arquitectónicas sustentables, como techos o terrazas verdes, entre otras tecnologías.

Más adelante, en el año 2011 se emite la Resolución 6523 de 2011 (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011c) por parte de la Secretaría Distrital de Ambiente, en la que se reglamenta y adoptan los lineamientos técnicos para los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en el Plan de Ordenamiento Zonal Norte (POZN), contribuyendo así a minimizar los impactos del desarrollo urbano, en cuanto a la reducción de volúmenes de aguas contaminadas en los medios receptores y la reducción del riesgo de inundaciones derivado de volúmenes y caudales punta de escorrentía.

Por otro lado, en el mismo año se emite la Resolución 6423 de 2011 (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011b), por medio de la cual se adopta la Guía Técnica de Techos Verdes de la Secretaria Distrital de Ambiente, donde se establecen los requerimientos técnicos y prácticas recomendables para la instalación de Techos Verdes en la ciudad de Bogotá.

En el caso de la Guía de Techos Verdes en la ciudad de Bogotá, emitida por la Secretaría Distrital, mediante la Subdirección de Ecourbanismo y Gestión Ambiental Empresarial, en el año 2011 (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011a), cita referencias regulatorias locales, dentro de las que se encuentra el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio., 2010), donde se definen

los lineamientos para el diseño de Cargas Muertas, Vivas y Fuerzas de Viento. Igualmente, la Guía Técnica presenta referencias técnicas especializadas a nivel mundial consideradas para la elaboración de este documento, teniendo presente que las regulaciones locales tienen cumplimiento prioritario sobre las referencias internacionales.

Por su parte, la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá, EAAB y la Secretaría Distrital de Ambiente, mediante convenio interadministrativo No. SDA 01269 de 2013 – No. EAB 9-07-26200-0912-20 13 establecieron la necesidad de mejorar el sistema de drenaje en la ciudad, buscando no sólo manejar el volumen de escorrentía para prevenir y/o mitigar inundaciones, sino que a su vez sea posible mejorar la calidad del agua que llega a los cuerpos de agua receptores de la ciudad y se promueva el aprovechamiento del agua lluvia para usos no potables y paisajísticos (CIIA, 2015). De esta manera, mediante el convenio mencionado surge el proyecto “Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.”. Desarrollado por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de los Andes (Martínez Acosta, 2017).

Este proyecto de investigación se adelantó en tres etapas. La primera consistió en determinar, priorizar y seleccionar las tipologías más apropiadas para optimizar el manejo de la escorrentía pluvial en el espacio público del área urbana de Bogotá D.C. La segunda etapa, se basó en la elaboración de una guía técnica de diseño, construcción, operación, mantenimiento y monitoreo del desempeño de las tipologías de SUDS seleccionadas, incluyendo diseños de ingeniería de detalle para la construcción y monitoreo de dos pilotos SUDS a escala real. Una vez culminadas estas dos etapas, la última consistió en elaborar un proyecto de norma técnica de la EAAB para las diferentes tipologías de SUDS estudiadas y monitoreadas para que a futuro sea una herramienta de apoyo para modificar las normas y cartillas de las Entidades del Distrito, responsables de implementar los SUDS en la ciudad (CIIA, 2015).

Posteriormente el estudio realizado por el Centro de Investigaciones de Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes en el año 2015, diseñó una metodología multi-escala (Ciudad, Local y Tipología) para la implementación de estos nuevos sistemas de

drenaje, la cual fue construida a partir de la revisión de literatura internacional en cuanto al diseño, construcción y operación de SUDS, así como también, del criterio de expertos a nivel local (CIIA, 2015). Esta metodología inicia con un análisis a nivel de ciudad en donde se analizan aspectos de tipo normativo, institucional y de planificación regional, mediante la interacción y coordinación de cada uno de los entes institucionales del distrito, relacionados con el drenaje urbano, involucrando de esta forma, los juicios de cada actor con el fin de identificar y jerarquizar los objetivos particulares de la implementación de SUDS en Bogotá (CIIA, 2015).

En cuanto a la legislación nacional, el Gobierno Colombiano, a través del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, expidió la resolución 330 de 2017 (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio., 2017), por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, manifestando en su artículo 153, la necesidad de generar estrategias para mitigar el efecto de la impermeabilización de áreas en el aumento de los caudales de escorrentía para nuevos proyectos de desarrollo urbano. Establece además, como objetivo de las estrategias generadas, reducir mínimo un 25% del caudal pico del hidrograma de creciente de diseño, con el fin de evitar sobrecargas en los sistemas pluviales y posteriores inundaciones. Para lo anterior, se deberá realizar un análisis de las condiciones de escorrentía antes y después del proyecto a ejecutar, evaluando la capacidad de los cuerpos receptores del sistema de alcantarillado y drenajes naturales con el fin de evitar inundaciones.

### **3.4 Modelo hidrodinámico SWMM**

El modelo de gestión de aguas pluviales EPA SWMM (Storm Water Management Model) de la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (USEPA, U.S. Environmental Protection Agency), es un modelo numérico que permite simular el comportamiento hidrológico e hidráulico de un sistema de drenaje urbano, usado principalmente para el estudio, diseño y análisis de drenajes urbanos, dimensionamiento de redes de alcantarillados, evaluación de inundaciones y alternativas de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Este programa simula la formación de escorrentía y cargas

contaminantes sobre subcuencas, para luego transportar estos flujos a través de la red de drenaje urbano hasta su disposición en el punto de salida (Gómez Valentín, 2007).

### **3.4.1 Modelo conceptual en SWMM**

Según (Gómez Valentín, 2007), SWMM considera el sistema de drenaje como conjunto de capas en las que se representa de forma general los diferentes procesos hidrológicos e hidráulicos, desde la precipitación hasta el flujo de aguas pluviales a través de las redes de alcantarillados. A continuación se describe el modelo conceptual según cada capa o módulo:

Capa Atmosférica (Rain Gage): en la cual se genera la precipitación que cae sobre la capa de Terreno.

Capa Terreno (Subcatchment): es la capa que representan las subcuencas y recibe la precipitación desde la capa Atmosférica en forma de lluvia. En este módulo se presentan dos procesos hidrológicos: las pérdidas de precipitación y la escorrentía superficial.

Capa de Transporte (Node – Link): es la capa que representa a la red de alcantarillado, la cual puede estar compuesta de secciones de cauce natural, cámaras, conductos, bombas, reguladores de flujo, así como por elementos de almacenamiento (depósitos de retención), siendo todos ellos los que transfieren el flujo y la carga contaminante hacia los puntos de salida del sistema.

Capa Subterránea (Aquifer): recibe la infiltración proveniente del módulo de Terreno y transfiere una parte hacia la capa de Transporte.

### **3.4.2 Procesos Hidrológicos en SWMM**

Una vez definida la cuenca de estudio se deberá adelantar el proceso de discretización, con el que se busca dividir la cuenca en subáreas o subcuencas buscando que estas sean lo más homogéneas posibles. El tamaño de la subcuenca de estudio se define también por el número de pozos de registro existentes, generalmente puede ser pequeño (aproximadamente 0.25 ha) y no es conveniente tener áreas muy grandes (de 20 a 30 ha), ya que puede variar la respuesta global de la cuenca al tener un detalle elevado en una parte de la misma (Gómez Valentín, 2007).



Los primeros procesos hidrológicos que permite calcular SWMM son las pérdidas de precipitación, siendo estas: almacenamiento superficial, evapotranspiración e infiltración (L. a. Rossman & Huber, 2016).

Dado que la evapotranspiración solo se tiene en cuenta en modelos de simulación continua, para el presente trabajo, no se considerará debido a que se adelantará simulación a escala de evento, por lo tanto este proceso no se presenta.

Posteriormente, el software permite el cálculo de la escorrentía y el transporte de onda. A continuación, se describen los procesos de las pérdidas de precipitación mencionadas.

### **Pérdidas por Almacenamiento Superficial**

El modelo de SWMM utiliza una subdivisión en 2 grandes zonas para el cálculo del almacenamiento: permeable e impermeable, a su vez, para la zona impermeable considera un porcentaje donde se puede presentar el almacenamiento y otro donde no se presenta (L. a. Rossman & Huber, 2016).

Para tener en cuenta la cantidad de agua que se almacena en la superficie se le debe asignar a cada sub-cuenca un valor de almacenamiento en milímetros según la ubicación antes descrita, así como el porcentaje de suelo impermeable que no presenta pérdidas de este tipo. Para la determinación de estos valores se debe tener en cuenta el tipo de zonas según su uso y cobertura de suelo. No son parámetros fáciles de estimar de manera precisa, luego deben aproximarse lo más rigurosamente posible (Valbuena Villalonga, 2016).

### **Pérdidas por Infiltración**

SWMM realiza un tratamiento específico de las pérdidas por infiltración, básicamente cuenta con 3 modelos para conocer estas pérdidas, cuya descripción se presenta a continuación:

#### **Método de Green-Ampt**

El modelo de Green y Ampt fue el primer modelo de base física que describía la infiltración del agua dentro del suelo y ha sido objeto de numerosos desarrollos en hidrología debido

a su simplicidad y comportamiento relativamente satisfactorio para una gran variedad de problemas (Zambrano Nájera, 2015).

Las ecuaciones derivadas por Green-Ampt en 1911, consisten en asumir que el suelo está totalmente saturado desde la superficie hasta la profundidad del frente húmedo y debajo del frente húmedo tiene la humedad anterior al evento de precipitación. A continuación, se presentan las ecuaciones de infiltración acumulada ( $I$ ) y capacidad de infiltración o infiltrabilidad ( $f_c$ ) para el modelo (Rey Valencia, 2019).

$$f_c(t) = K_s \left( \frac{\psi \Delta \theta}{I(t)} + 1 \right) \quad \text{Ecuación 3-1}$$

$$I(t) = K_s t + \psi \cdot \Delta \theta \cdot \ln \left( 1 + \frac{I(t)}{\psi \Delta \theta} \right) \quad \text{Ecuación 3-2}$$

$$\Delta \theta = \eta - \theta_i \quad \text{Ecuación 3-3}$$

$f_c$ , capacidad de infiltración o infiltrabilidad [mm/h],  $I(t)$ , infiltración acumulada para el momento  $t$  [mm],  $\Delta \theta$ , déficit inicial humedad (fracción),  $K_s$ , conductividad Hidráulica [mm/h],  $\psi$ , potencial de succión del frente húmedo [mm];  $\eta$ , porosidad (fracción);  $\theta_i$ , humedad inicial (fracción).

#### Método de Horton

De acuerdo con (Gómez Valentín, 2007), El desarrollo de la ecuación de Horton, se plantea proponiendo que la variación de la capacidad de infiltración en cualquier momento es proporcional a la diferencia entre la capacidad actual de infiltración en el terreno y la capacidad límite asintótica de infiltración que presenta ese terreno.

$$\frac{df}{dt} = -k(f - f_\infty) \quad \text{Ecuación 3-4}$$

Si se acepta que a tiempo cero, la capacidad de infiltración del terreno es de valor  $f_0$ , se puede integrar la ecuación anterior para obtener (Gómez Valentín, 2007):

$$f = f_\infty + (f_0 - f_\infty)e^{-kt} \quad \text{Ecuación 3-5}$$

Donde:  $f$  = capacidad de infiltración [mm/h];  $f_\infty$  = capacidad de infiltración mínima o valor de infiltración para un tiempo infinito [mm/h];  $f_0$  = valor inicial de la capacidad de infiltración

para tiempo cero [mm/h];  $t$ = tiempo desde el inicio de la lluvia [h];  $k$  = Constante de proporcionalidad [ $\text{h}^{-1}$ ]

La anterior ecuación no se aplica directamente pues la capacidad de infiltración del terreno no decrece tan rápidamente a menos que la intensidad de precipitación sea siempre superior a la capacidad de infiltración. Si la curva de infiltración está por encima del hietograma, la capacidad de infiltración será igual a la intensidad de la lluvia,  $i(t)$  tal como se muestra en la Ecuación 3-6:

$$f(t) = \text{mínimo}[f, i(t)] \quad \text{Ecuación 3-6}$$

$i$ =intensidad de lluvia [mm/h]

Teniendo presente que los valores habituales de la infiltración inicial en un terreno son en general, superiores a la intensidad inicial de un suceso de lluvia, una aplicación directa de Horton supone una reducción de la capacidad de infiltración del terreno independientemente de la cantidad agua que se ha infiltrado en el suelo, Este problema se aborda trabajando con la función de infiltración acumulada  $F(t)$  según la Ecuación 3-7:

$$F(t) = \int_0^t f(t) = f_{\infty}t + \frac{f_0 - f_{\infty}}{k}(1 - e^{-kt}) \quad \text{Ecuación 3-7}$$

$F$ = capacidad de infiltración acumulada en el tiempo  $t$  [mm]

Es posible estimar el tiempo en que la cantidad de agua de precipitación iguala a la infiltrada en el terreno. Dicho tiempo se denomina tiempo de encharcamiento o instante de inicio de escurrimiento y representa el instante a partir del cual se produce una escorrentía neta.

#### Método de Número de Curva-SCS

Este método se adoptó a partir del método NRCS (Servicio de Conservación de Recursos Naturales) para estimar la escorrentía. Asume que la capacidad de infiltración total de un suelo se puede encontrar a partir del número de curva tabulado del suelo. Durante un evento de lluvia, esta capacidad se agota en función de la lluvia acumulada y la capacidad restante. SWMM utiliza una forma incremental modificada del método que solo tiene en

cuenta las pérdidas de infiltración, ya que las otras abstracciones se modelan por separado (L. A. Rossman, 2015, 2016).

### Transformación Lluvia-Esorrentía

SWMM convierte datos de precipitación efectiva (una vez restadas las pérdidas) en esorrentía superficial. El hecho de que la cuenca de estudio se divida en una serie de sub-cuencas de menor tamaño permite captar el efecto de la variabilidad espacial. Por lo tanto, calcula la esorrentía generada en cada una de las sub-cuencas por separado (Valbuena Villalonga, 2016).

La transformación lluvia-esorrentía es calculada por SWMM tomando cada sub-cuenca como un depósito lineal en el que se aplica formulación mixta entre el modelo de depósito y una ecuación tipo Onda Cinemática, de esta forma, se relaciona un nivel  $H$  con el caudal de salida, asumiendo cierta abstracción inicial  $h_o$ , de forma que no se genere esorrentía hasta no ser superada esta abstracción, una vez alcanzada la altura  $(H-h_o)$ , coincide con la altura normal del caudal  $Q$  de salida (Gómez Valentín, 2007).

SWMM5 conceptualiza la sub-cuenca como una superficie rectangular de área  $A$ , con pendiente uniforme  $I_o$  y ancho  $W$  que drena hacia un único punto de evacuación.

De acuerdo con (Valbuena Villalonga, 2016), se asume que el flujo de agua por la superficie de la sub-cuenca se comporta como flujo uniforme en un canal rectangular de ancho  $W$ , altura  $H-h_o$ , y pendiente  $I_o$ , la fórmula de Manning se puede utilizar para expresar el caudal de esorrentía  $Q$ :

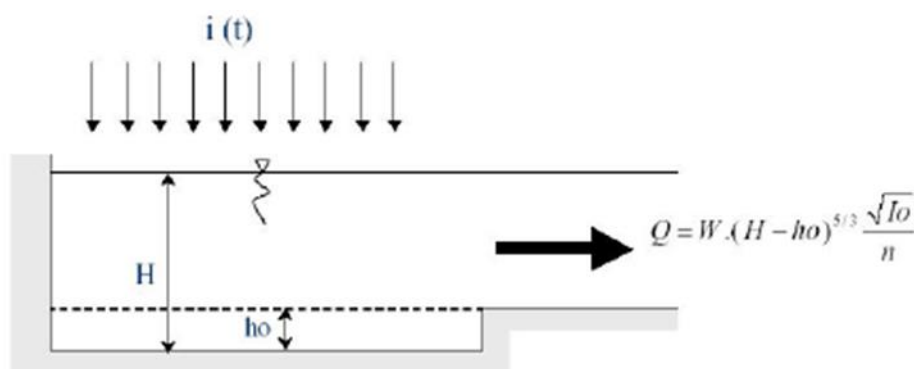
$$Q = \frac{1}{n} I_o^{1/2} R h^{2/3} A \quad \text{Ecuación 3-8}$$

Donde  $n$  es el coeficiente de Manning de la superficie,  $A$  el área de la sección transversal del supuesto canal rectangular (de altura  $H-h_o$  y ancho  $W$ ) y  $Rh$  el radio hidráulico asociado a esta área. Dado que  $W$  será siempre mucho mayor que  $H$ , podemos aproximar  $Rh = H-h_o$ ,

$$Q = W * (H - h_o)^{5/3} * \frac{\sqrt{I_o}}{n}$$

Ecuación 3-9

La anterior ecuación se puede representar en la Figura 3-11, de acuerdo al modelo conceptual considerado por (Gómez Valentín, 2007).



**Figura 3-11:** Modelo conceptual de depósito aplica a SWMM,  
Fuente: (Gómez Valentín, 2007).

Donde:

$I(t)$ =Intensidad de la precipitación caída en la subcuenca [mm/h]

$W$ =Ancho de la subcuenca [m]

$H$ =Altura de agua en las subcuencas [mm]

$h_o$ =Abstracción inicial [mm]

$I_o$ =Pendiente media de la cuenca [%]

$n$ =coeficiente de rugosidad de Manning superficial [adimensional]

$Q$ =caudal de escorrentía [mm/h]

### 3.4.3 Cálculo hidráulico en SWMM

Para desarrollar el cálculo del flujo de agua en los conductos de la red de drenaje urbana, SWMM se basa en los principios de conservación de la masa y cantidad de movimiento para el flujo gradualmente variado, no permanente; es decir, las ecuaciones de Saint Venant (Valbuena Villalonga, 2016).

La ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

Ecuación 3-10

La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(I_o - I_f)$$

Ecuación 3-11

Donde Q es el caudal circulante, A es el área la sección transversal del conducto ocupada por el flujo de agua, x es la abscisa en la dirección del conducto, t es el tiempo, q el caudal específico, g la aceleración de la gravedad, y el calado,  $I_o$  es la pendiente del conducto e  $I_f$  es la pendiente de la línea de energía (Valbuena Villalonga, 2016)

El modelo de SWMM permite aplicar 3 opciones de cálculo hidráulico (Gómez Valentín, 2007):

#### Régimen Permanente (Steady flow)

Esta opción de cálculo no permite considerar efectos de propagación o laminación, solo puede aplicarse a redes de tipo arborescente, aquellas en que en cada nodo hay un único colector de salida. En esta opción el hidrograma calculado por los conductos de aguas arriba se traslada para aguas abajo sin modificar o presentar cambios de tiempos.

#### Onda Cinemática (Kinematic Wave):

El modelo limita al máximo caudal de circulación por cada conducto como el caudal a sección llena. La onda cinemática no permite atenuar puntas de caudal, no modela la entrada en carga, ni tampoco los efectos de refluo.

En este caso se resuelve una aproximación de las ecuaciones de Saint-Venant, considerando la ecuación de equilibrio de fuerzas solo con las componentes de gravedad y fricción. Permite trabajar con intervalos de tiempo mayores que otras opciones, del orden de varios minutos frente a pocos segundos, y es más estable desde el punto de vista de

cálculo sobre todo en caso de flujos rápidos. Solamente aplica para redes arborescentes. Predomina el régimen rápido en toda la red.

**Onda Dinámica (Dynamic wave):**

Esta opción considera todas las fuerzas actuantes, gravedad, fricción, presión e inercia, y permite simular los efectos de laminación, reflujos, condiciones de contorno aguas abajo o entrada en presión de la red. Es el cálculo que más se aproxima a la realidad de lo que sucede en la red de drenaje.

Al resolver las ecuaciones completas de Saint Venant, puede aplicarse a redes malladas y a las arborescentes. Acepta flujos superiores en cada conducto al máximo aceptable a sección llena en régimen permanente, y permite simular la salida de agua desde la red, eliminándola del sistema o almacenándola en cada cámara para introducirla de nuevo a la red.

En el caso de SWMM, dado el esquema numérico de solución que utiliza para resolver las ecuaciones, tipo diferencias finitas explícitas, necesita intervalos de tiempo más cortos, de menos de un minuto en general.

## **4. Metodología**

En este capítulo se presenta la metodología a utilizar en el trabajo. Primero se definió utilizar la cuenca Palogrande para realizar la revisión del comportamiento de SUDS en cuencas urbanas de alta y media montaña, por tanto en la primera parte de este capítulo se describe la cuenca y se describe los ajustes que se deben hacer al modelo ya realizado por Rey Valencia en su tesis de maestría. Segundo, el objetivo de evaluación de este trabajo inicialmente se centró en la evaluación de los depósitos de lluvia, pero no de manera teórica sino aquellos disponibles comercialmente para la ciudad de Manizales, por tanto se describen los depósitos disponibles. Complementariamente, se realizó la evaluación del comportamiento de los depósitos de lluvia incorporando la alternativa de celdas de bioretención.

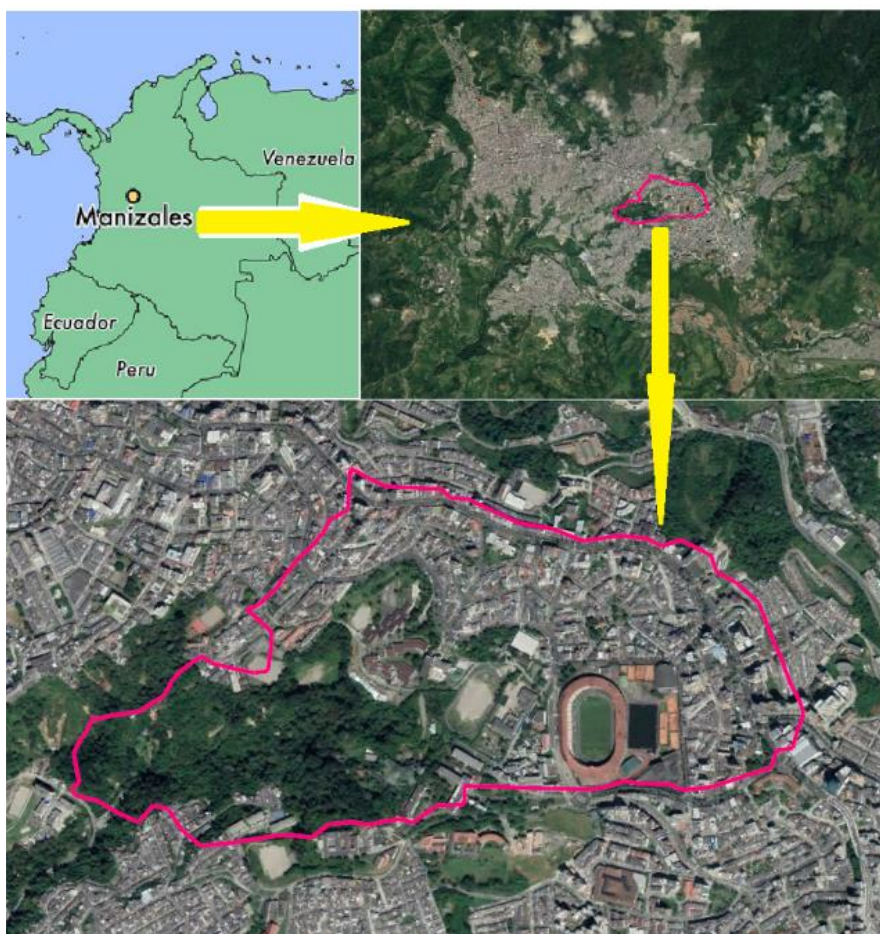
### **4.1 Características y parámetros cuenca Palogrande para modelación con SWMM**

#### **4.1.1 Definición zona de estudio**

Dentro de la investigación adelantada por (Rey Valencia, 2019), titulada “Propuesta de sistema de drenaje urbano sostenible para cuencas de montaña con alta pendiente”, se realizó el inventario de inundaciones pluviales en la ciudad de Manizales, registrando 48 eventos entre los años 1953 y 2016. La información de los eventos de inundaciones se relacionó con las condiciones topográficas según la localización por barrio o zona de ciudad. Una vez identificadas las zonas críticas, se definió la cuenca Palogrande como zona de estudio, dados los eventos de inundación encontrados en ella y la instrumentación



con que se cuenta cerca de la cuenca. A continuación se observa la localización en la Figura 4-1:



**Figura 4-1.** Localización de la zona estudio, fuente propia.  
**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.2 Descripción zona de estudio

El área objeto de estudio se localiza en el sector oriental de la ciudad de Manizales, con una extensión aproximada de 1 km<sup>2</sup>, área que hace parte de la Cuenca experimental urbana Palogrande – San Luis, con un área aproximada de 2.5 km<sup>2</sup> siendo uno de los afluentes principales al río Chinchiná. El uso y cobertura predominante de la cuenca corresponde al uso urbano y en menor medida se tiene un área boscosa y de matorrales. La cuenca se encuentra instrumentada desde el año 2006, contando con 4 estaciones pluviométricas (San Luis, Posgrados, Arquitectura y Bolivariana) y 1 estación

hidrometeorológica (Ruta 30) (SUAREZ, 2008). El régimen de precipitación de la zona, tiene un comportamiento bimodal con valores máximos en los meses de abril (204.5 mm) y octubre (261.3 mm) y una precipitación media anual de 1903.6 mm. La cuenca de estudio presenta una topografía abrupta con una diferencia altimétrica de 192 m entre el punto más alto 2166 m.s.n.m. y el punto más bajo 1974 m.s.n.m (Rey Valencia & Zambrano Nájera, 2017). Así mismo se presentan altas pendientes, con valores que oscilan entre 1.23% y 34.53% para la zona urbana y 22.56% y 56.34% para la zona natural (Rey Valencia, 2019).

### 4.1.3 Modelo hidrodinámico

Para adelantar la modelación hidrodinámica con el programa SWMM, se utilizó la información de la Tabla 4-1 recopilada por (Rey Valencia, 2019):

**Tabla 4-1:** Datos base para el modelo

Tipo	Información	Parámetros
Hidráulico	Mapas de dirección de flujo MED Mapas de red de alcantarillado	Discretización del área de estudio en subcuencas
Usos del suelo	Mapa de uso del suelo año 2005 Fotografía aérea 2014	Coeficiente de rugosidad de Manning (áreas permeables e impermeables) Almacenamiento superficial (áreas permeables e impermeables) Porcentaje de área impermeable
Tipos de suelos	Mapa de suelos Apiques realizados en la zona de estudio	Conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) Potencial de succión ( $\psi$ ) Déficit de humedad inicial ( $\Delta\theta$ )
Clima	Eventos de precipitación Series de caudal Curva IDF	Eventos de calibración y validación Eventos de diseño
Topografía	Curva de nivel cada 2 m Modelo de elevación digital Lidar con resolución 0.5x0.5m	Pendiente Ancho

- Datos de Lluvia y caudal

Las series de las estaciones mencionadas, fueron utilizadas para la definición de la lluvia y los caudales con los que se obtuvieron los eventos de precipitación y caudal, con los que se adelantaron la calibración y la validación del modelo hidrodinámico (Tovar Hernández & Zambrano Nájera, 2014).

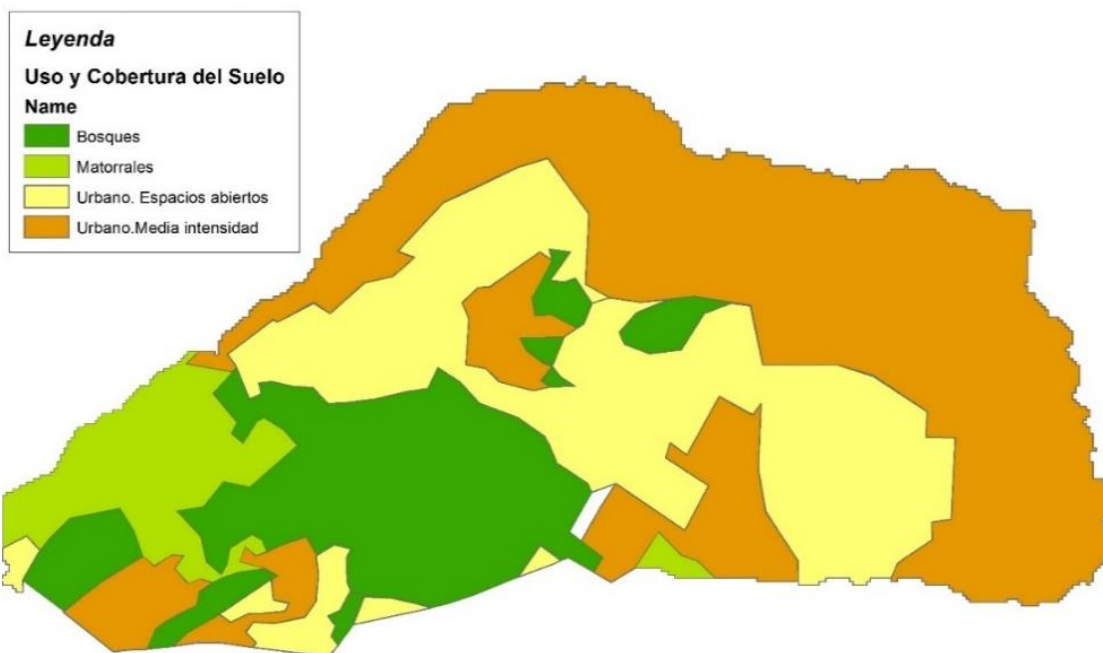
- Propiedades del uso del suelo

Como propiedades derivadas del uso y cobertura del suelo se tienen:

- Coeficiente de rugosidad
- Capacidad de interceptación de las coberturas
- Almacenamiento superficial causado por las depresiones.

La caracterización para conocer las coberturas y usos del suelo adelantada en la cuenca Palogrande se puede observar en el mapa de la Figura 4-2, obtenido mediante fotografía aérea del año 2005 (Cabezas Suárez & Zambrano Nájera, 2016).

Según la caracterización, en la zona alta de la cuenca predomina el uso de suelo urbano con media intensidad. En menor proporción y con mayor concentración en la zona media, se presenta suelo urbano con espacios abiertos. Por último, las áreas con características de bosques y matorrales, se encuentran en la zona sur-occidental.



**Figura 4-2:** Mapa de usos de suelo año 2005  
**Fuente:** (Cabezas Suárez & Zambrano Nájera, 2016)

Una vez determinadas las zonas permeables e impermeables, se establece el coeficiente de rugosidad según recomendaciones del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-ARS, 2008). Para la calibración se asume en el área impermeable un valor

inicial de 0.012 para todas las Subcuencas. Para el área permeable se tomaron rugosidades con valores entre 0.055 y 0.6 según el tipo de rugosidad encontrada en el mapa de usos del suelo, como se observa en la Tabla 4-2.

**Tabla 4-2:** Valores del coeficiente de rugosidad para áreas permeables según el uso del suelo

**Fuente:** adaptado de (Rey Valencia, 2019; USDA-ARS, 2008)

Uso y cobertura del suelo	Coeficiente de rugosidad de Manning para áreas permeables
Bosques	0.600
Matorrales	0.055
Urbano Espacios Abiertos	0.130
Urbano Intensidad Media	0.150

Definición del porcentaje del área impermeable.

Esta variable se deriva del mapa de usos del suelo, con la aplicación del programa Arcgis e información de fotografía satelital (ESRI, 2014).

Definición de almacenamiento superficial e interceptación.

Para la modelación hidrodinámica adelantada por (Rey Valencia, 2019), se consideró el almacenamiento superficial tanto para áreas impermeables como para áreas permeables, lo anterior dado el gran porcentaje de área de bosques que existe en la zona baja de la cuenca. Los valores considerados en el modelo se presentan en la Tabla 4-3.

**Tabla 4-3:** Valores del almacenamiento superficial para las áreas permeables e impermeables

**Fuente:** adaptado de (Rey Valencia, 2019), <sup>a</sup>(Woods-Ballard et al., 2007), <sup>b</sup>(Hromadka & Whitley, 1989) <sup>c</sup>(Tsihrintzis & Hamid, 2001)

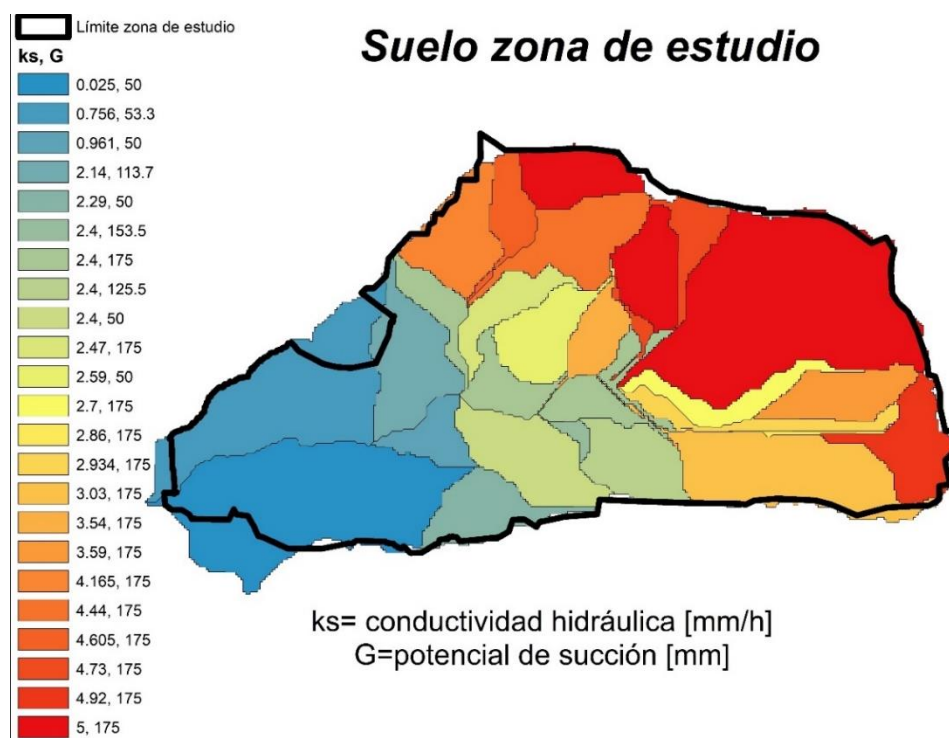
Uso y cobertura del suelo	Almacenamiento en las áreas Permeables e impermeables (mm)
Bosques	7.6 <sup>a</sup>
Matorrales	5.1 <sup>b</sup>
Área Urbana de media intensidad	2.5 <sup>a</sup>
Área Urbana de baja intensidad	5.1 <sup>a</sup>
Área Urbana de media intensidad	0.8 <sup>c</sup>
Área Urbana de baja intensidad	1.0 <sup>c</sup>

- Propiedades derivadas del suelo.

Las propiedades derivadas del suelo son: Conductividad hidráulica ( $K_s$ ), potencial de succión ( $\psi$ ) y el déficit de humedad inicial ( $\Delta\theta$ ) (Rey Valencia, 2019).

En 2016, se adelantaron 30 sondeos geotécnicos en diferentes puntos de la cuenca Palogrande, determinando propiedades mecánicas e hidrológicas para cada uno de ellos (Giraldo, 2016).

En el mapa de la Figura 4-3, se presentan los valores de Conductividad hidráulica y Potencial de succión según la información obtenida de los anteriores sondeos. Para el caso del Déficit de humedad se asume un valor de 0.05, según investigación adelantada por (Rey Valencia, 2015) en su estudio “Comparación entre modelos empíricos y modelos de base física para cuencas urbana de media y alta montaña”, en la cuenca Palogrande como zona de estudio.



**Figura 4-3:** Conductividad hidráulica y potencial de succión  
**Fuente:** (Rey Valencia, 2019)

- Información de Alcantarillado

La información de la red de alcantarillado usada para el modelo hidrodinámico fue facilitada por la empresa de acueducto y alcantarillado Aguas de Manizales SA ESP (Aguas de Manizales, 2014), en la que se pudo obtener la infraestructura instalada conformada por cámaras, conductos, sumideros y descoles para la cuenca de estudio. La anterior

información se comparó con la red actualizada para el año 2019 (Aguas de Manizales, 2019), encontrando mínimos cambios que no representaban diferencias significativas para desarrollar el modelo (Rey Valencia, 2019).

- Quebrada Palogrande dentro del modelo hidrodinámico

Con el fin de incorporar la quebrada Palogrande dentro del modelo de SWMM, se consideró como un canal abierto rectangular de 6 metros de ancho por 3 metros de alto previa revisión de los niveles máximos de la lámina de agua registrados por la estación Quebrada Palogrande-Ruta 30 del 2009 al 2013 (Rey Valencia, 2019).

Para el coeficiente de rugosidad de Manning, se tomó un valor de 0.33 el cual se obtuvo mediante mediciones en campo realizadas por (López, 2017).

- Topografía

El modelo desarrollado cuenta con curvas de nivel cada 2 metros, cuya información fue facilitada por Aguas de Manizales SA ESP. La resolución establecida para el modelo fue de 10x10 metros, al representar de forma adecuada las pendientes para cada subcuenca (Rey Valencia, 2019).

Mediante la información topográfica se pudieron obtener parámetros como la pendiente promedio para cada una de las subcuencas y el ancho de estas, determinado a partir de la división entre el área de cada subcuenca y la longitud máxima de flujo superficial, obtenida como la distancia que recorre el flujo desde el punto más lejano de la subcuenca hasta donde ingresa a la red de alcantarillado (Rey Valencia, 2019).

$$\text{Ancho de subcuenca} = \frac{\text{Área de Subcuenca}}{\text{Longitud máxima de flujo}} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

#### 4.1.4 Calibración, análisis de sensibilidad y discretización.

- Análisis de Sensibilidad

En el análisis de sensibilidad realizado por (Rey Valencia, 2019), se obtuvo que el modelo era sensible a los parámetros de ancho de las subcuencas, coeficiente de rugosidad de

Manning para áreas impermeables y áreas permeables en las subcuencas y coeficiente de rugosidad de Manning para el cauce, por lo que consideró los siguientes cambios:

- Aumentar el ancho de las subcuencas en 150 m.
- Dejar el coeficiente de rugosidad de Manning de las áreas impermeables en el valor mínimo 0.011
- Disminuir el coeficiente de rugosidad de Manning de las áreas permeables para todas subcuencas en un rango de 0.55 a 0.53.
- Disminuir el coeficiente de rugosidad de Manning del cauce, tomando un rango de 0.10 a 0.15, si es necesario hasta el valor mínimo recomendado por la literatura.
- Calibración

El proceso de calibración se desarrolló con 5 eventos con un tiempo de precipitación máxima menor o igual al tiempo de concentración de la cuenca, definido en 22 minutos por (Vélez Upegui & Botero Gutiérrez, 2011). Los eventos seleccionados para la calibración correspondieron a los años 2009, 2010 y 2011 con intensidades promedio entre 9.58 y 20.12 mm/hr y duraciones entre 50 y 95 minutos, tal como se aprecia en la Tabla 4-4. Dentro de los anteriores eventos fueron considerados 4 con un solo caudal pico para facilitar la calibración y un solo evento con múltiples picos para ajustarla a este tipo de eventos (Rey Valencia, 2019).

**Tabla 4-4:** Eventos considerados para la calibración

Fecha	Evento #	Precipitación total [mm]	Intensidad promedio [mm/h]	Duración [min]
01/07/2010	1	16.77	20.12	50
14/04/2011	2	15.61	17.03	55
18/06/2009	3	11.93	11.02	65
2/03/2011	4	29.01	18.32	95
07/04/2009	5	13.58	9.58	85

- Discretización

Una vez definidas las propiedades y características de la cuenca de estudio, se procede a realizar el proceso de discretización para el modelo inicialmente considerado. La Cuenca es dividida en subcuencas buscando que la esorrentía superficial sea captada por la red

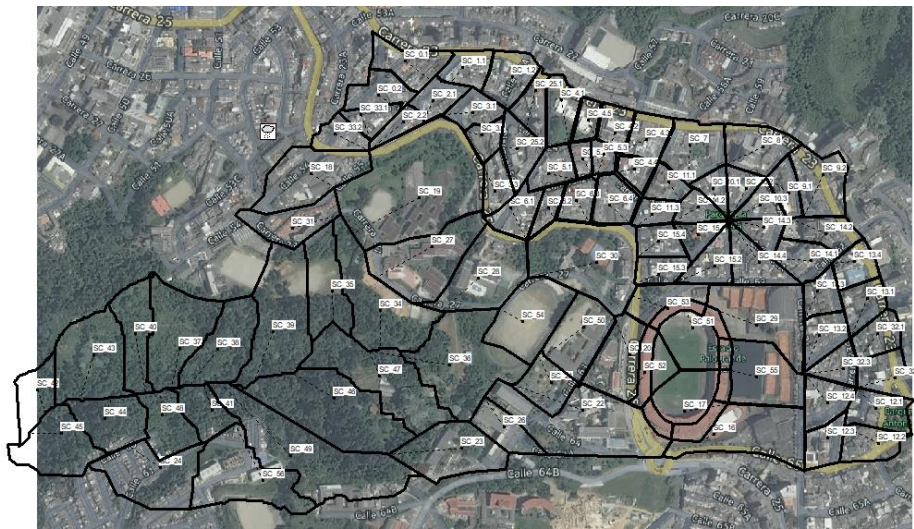


de alcantarillado y el flujo conducido a un punto de salida. En total se obtuvieron 56 cuencas con áreas entre 0,62 y 2.97 ha (Rey Valencia, 2019).

## 4.2 Recalibración y modelación cuenca Palogrande

### 4.2.1 Nueva discretización para recalibración de modelo

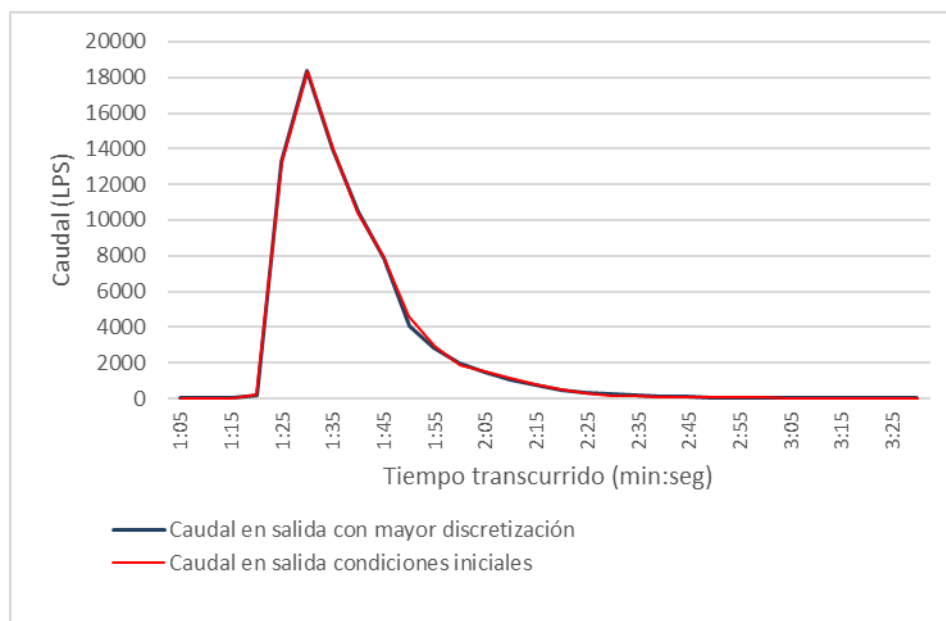
El trabajo citado anteriormente realizado por (Rey Valencia, 2019), dentro de sus recomendaciones consideró mejorar el nivel de discretización de la cuenca y probar mayor cantidad de SUDS en esta, por tal razón para este trabajo, se revisó nuevamente la cuenca, se discretizará aún más y se implementarán nuevos SUDS. Por tanto, inicialmente se adelantó el proceso de una nueva discretización, dividiendo la zona alta en un mayor número de subcuencas a las consideradas inicialmente en el modelo por (Rey Valencia, 2019) y buscando igualmente que la escorrentía superficial sea captada por la red de alcantarillado y el flujo conducido a un punto de salida. En total se obtuvieron 92 subcuencas con áreas entre 0,30 y 4.08 ha, como se aprecia en la Figura 4-4:



**Figura 4-4:** Cuenca Palogrande con mayor discretización en zona alta

Una vez adelantada la discretización en la cuenca de estudio, se verifica el hidrograma de salida tanto en el modelo nuevamente discretizado como en el modelo inicialmente validado, observando que no hay cambios considerables. En la Figura 4-5 se observan los 2 hidrogramas de salida:





**Figura 4-5:** Hidrograma de salida en cuenca discretizada y cuenca inicialmente validada.

## 5. Resultados modelación hidrodinámica

### 5.1 Identificación de subcuencas para modelación

En la Figura 5-1, se observa la zona alta de la cuenca Palogrande con la identificación de las subcuencas nuevamente discretizadas para aplicar el modelo de SWMM.

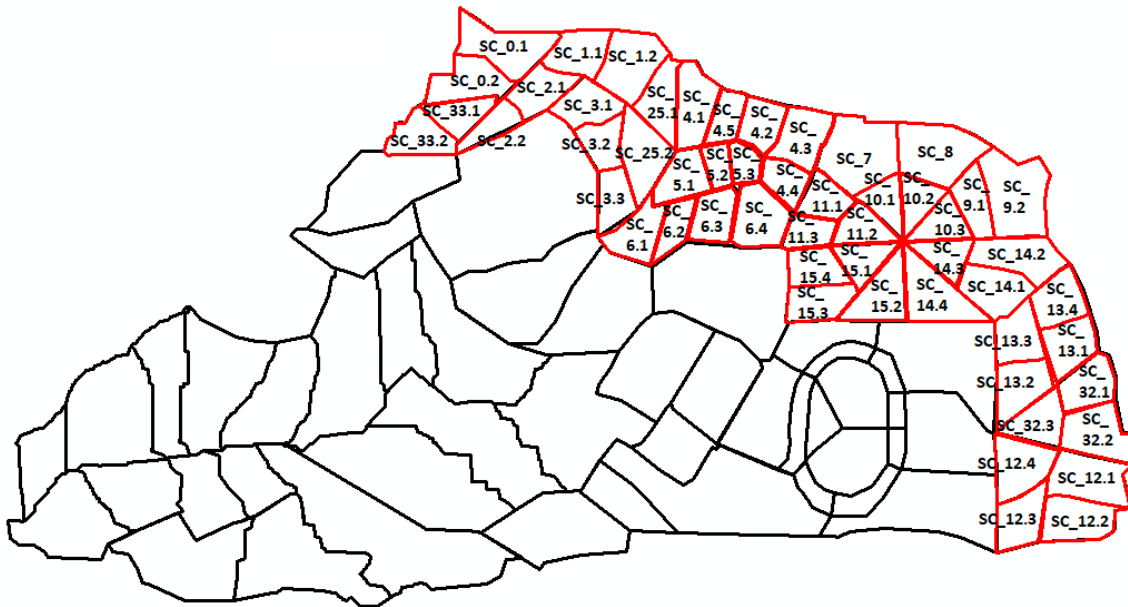


Figura 5-1: Subcuencas identificadas en la zona alta

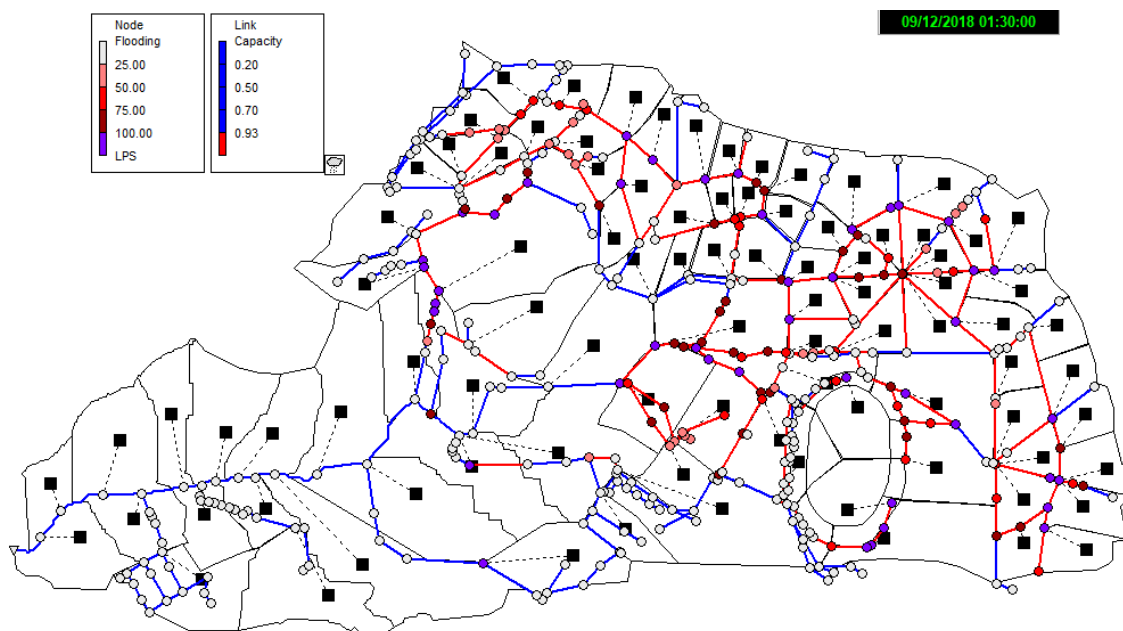
### 5.2 Modelación sin SUDS

Una vez identificadas e incorporadas las subcuencas con la nueva discretización, se procede a revisar el modelo de SWMM con los parámetros obtenidos por (Rey Valencia, 2019) presentados en el capítulo 4. Estos fueron nuevamente revisados, y se comprobó que no se alterarán los resultados de la calibración previa.

Al realizar la simulación del modelo hidrodinámico de SWMM, con las condiciones antes mencionadas, se observa que el sistema presenta conductos que entran en carga a partir del minuto 10 hasta el minuto 75, en el minuto 15 ya se aprecian algunos conductos trabajando bajo condiciones críticas, para el minuto 20 se observan las primeras cámaras inundadas. La condición más crítica del modelo se presenta al minuto 30, donde se aprecian 127 cámaras que presentan inundación, de las cuales 43 presentan valores

mayores a 100 l/s. El comportamiento hidráulico para el minuto 30 como momento crítico se observa en la Figura 5-2.

Por otro lado, en la ilustración se pueden apreciar 201 conductos que trabajan con más del 93 % de su capacidad, mostrando una condición crítica según el RAS -2017 (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio., 2017), lo que representa el 51.1% de los conductos del sistema trabajando bajo estas condiciones para el minuto 30.

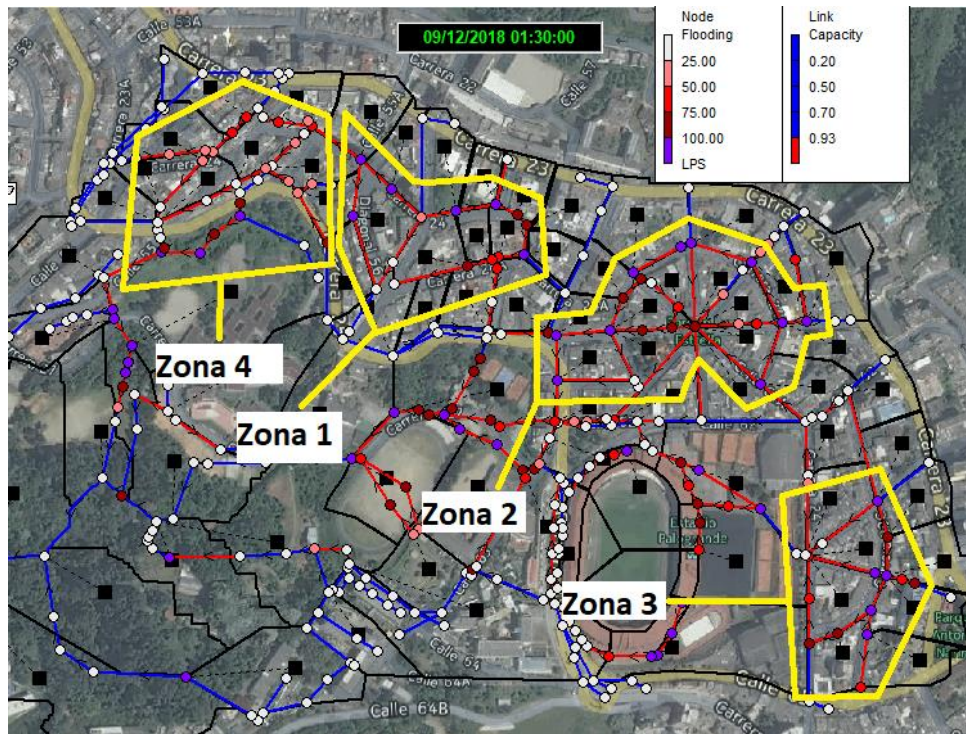


**Figura 5-2:** Comportamiento hidráulico del modelo sin SUDS

## 5.3 Modelación con SUDS

### 5.3.1 Identificación de zonas para evaluación de la aplicación de SUDS

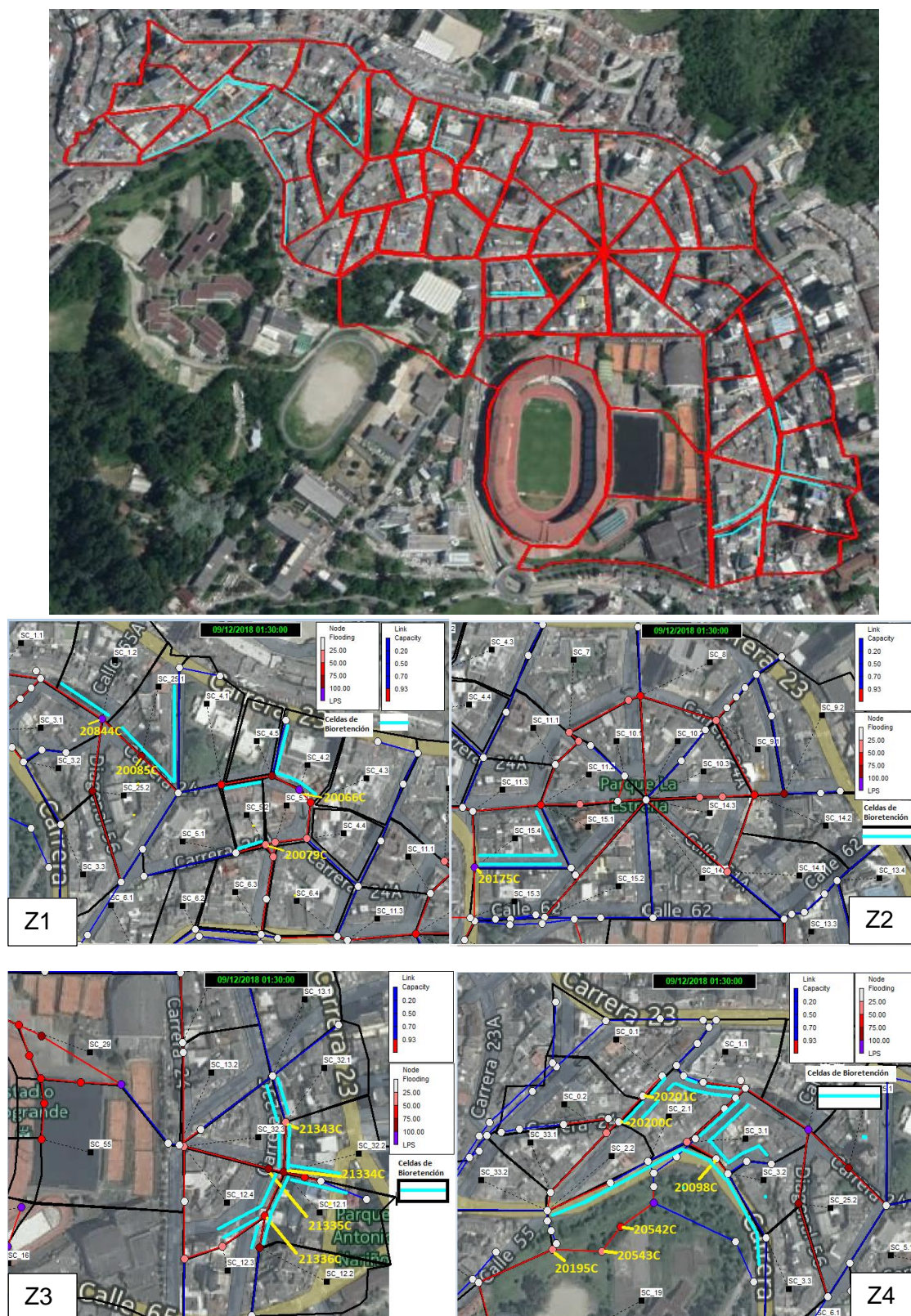
De acuerdo con el comportamiento hidráulico presentado en la modelación sin SUDS, se identificaron 4 zonas con condiciones más críticas en las que se observaron varias cámaras bajo condiciones de inundación y conductos trabajando al límite de su capacidad. En la Figura 5-3 se presentan las zonas seleccionadas para la evaluación de SUDS en las primeras 7 opciones planteadas.



**Figura 5-3:** Zonas identificadas para la evaluación de SUDS

Complementario a las zonas identificadas anteriormente, se determinaron diferentes puntos en cada una de ellas para aplicar las celdas de bioretención como alternativa considerada en la opción 8, los cuales se muestran en la Figura 5-4:





**Figura 5-4:** Ubicación de celdas de bioretención dentro de las 4 zonas para la evaluación de SUDS

### 5.3.2 Condiciones de zonas críticas para modelo antes de SUDS

Al tener identificadas las 4 zonas críticas en el modelo sin SUDS, se determinaron las condiciones hidráulicas para realizar la comparación con el modelo aplicando las opciones de SUDS. A continuación, se presenta la Tabla 5-1 donde se muestran las condiciones hidráulicas relacionadas con la cantidad de cámaras inundadas y volúmenes de inundación establecidos para periodos de 10 minutos para las zonas 1, 2, 3 y 4.

**Tabla 5-1:** Condiciones hidráulicas de zonas críticas en la simulación sin SUDS

Tiempo (Min)	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4	
	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)
0-10	1	0.007	1	0.003	1	0.025	2	0.009
10-20	1	0.030	5	0.204	0	0.000	7	0.168
20-30	2	0.141	11	0.839	1	0.067	5	0.141
30-40	3	0.296	1	0.065	0	0.000	3	0.145
40-50	5	0.345	0	0.000	3	0.154	2	0.260
>50	0	0.000	0	0.000	5	0.479	2	0.342
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>0.819</b>	<b>18</b>	<b>1.111</b>	<b>10</b>	<b>0.725</b>	<b>21</b>	<b>1.065</b>

De acuerdo a la Tabla 5-1, se observa que en la zona 2 se presenta mayor volumen de inundación, con un total 1111000 litros y 18 cámaras inundadas con diferentes tiempos de inundación, del anterior volumen, 839000 litros se presentaron entre 20 y 30 minutos en 11 cámaras inundadas. Por otro lado, la zona que menos volumen de inundación presentó fue la zona 3, con 725000 litros, cuyo mayor volumen se presentó a los 50 minutos de iniciada la escorrentía, con un valor de 479000 litros en 5 cámaras inundadas.

### **5.3.3 Alternativas SUDS para implementar**

Manizales al contar con una topografía fuerte y altas pendientes en un gran porcentaje de sus zonas urbanas, presenta limitaciones para la implementación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible. Sin embargo, una vez revisadas las características de los tipos de SUDS definidos en el numeral 3.1, se concluye que una de las tipologías con mejor comportamiento para atenuar caudales punta y altos flujos de escorrentía en este caso, corresponde a los depósitos de lluvia, por no requerir áreas representativas para su implementación, ni interferir en procesos de infiltración de los suelos que conlleven a la presencia de deslizamientos en zonas susceptibles con altas pendientes. Por otro lado y teniendo presente las características urbanísticas de la ciudad en la cuenca Palogrande, se tiene como alternativa complementaria, las celdas de bioretención.

#### **Barriles como depósitos de lluvia**

SWMM considera los barriles de lluvia como contenedores que recogen escorrentía durante los eventos de lluvia liberándola o almacenándola para su reutilización durante los periodos secos. Estos permiten, por lo tanto, almacenar en sitio el agua de lluvia y transportarla directamente hacia la red de alcantarillado o hacia las áreas permeables cercanas a su ubicación, siendo elementos puntuales que pueden aplicar a nivel de una casa o edificación (Valbuena Villalonga, 2016).

A continuación, en la Figura 5-5 se presentan los parámetros e información requerida por el modelo.

**LID Control Editor**

Control Name:

LID Type:

Storage | Drain

Barrel Height (in. or mm)

OK Cancel Help

**LID Control Editor**

Control Name:

LID Type:

Storage | Drain

Flow Coefficient\*

Flow Exponent

Offset Height (in. or mm)

Drain Delay (hours)

[Drain Advisor](#)

\*Units are for flow in either in/hr or mm/hr; use 0 if there is no drain.

OK Cancel Help

**Figura 5-5:** Parámetros e información requerida para el modelo hidrodinámico

### Celdas de Bioretención

Las celdas de bioretención son sistemas de gran flexibilidad para el manejo del agua superficial que pueden ser integrados en planes de desarrollo urbano, usando diferentes formas, tamaños, materiales, vegetación y dimensiones. Generalmente se usan para gestionar y tratar la escorrentía de eventos frecuentes de lluvias. Para eventos extremos

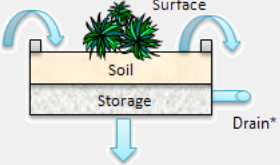


se debe construir un sistema de sobre-flujo que descargue en el sistema de drenaje (Woods Ballard et al., 2015).

En la Figura 5-6 se presentan los parámetros e información requerida por el modelo con la aplicación de celdas de bioretención.

Control Name:

LID Type:



\*Optional

OK Cancel Help

Surface	Soil	Storage	Drain
Berm Height (in. or mm)		<input type="text" value="150"/>	
Vegetation Volume Fraction	<input type="text" value="0.2"/>		
Surface Roughness (Mannings n)	<input type="text" value="0.4"/>		
Surface Slope (percent)	<input type="text" value="4"/>		

Surface	Soil	Storage	Drain
Thickness (in. or mm)	<input type="text" value="600"/>		
Porosity (volume fraction)	<input type="text" value="0.5"/>		
Field Capacity (volume fraction)	<input type="text" value="0.2"/>		
Wilting Point (volume fraction)	<input type="text" value="0.1"/>		
Conductivity (in/hr or mm/hr)	<input type="text" value="65"/>		
Conductivity Slope	<input type="text" value="30"/>		
Suction Head (in. or mm)	<input type="text" value="165"/>		

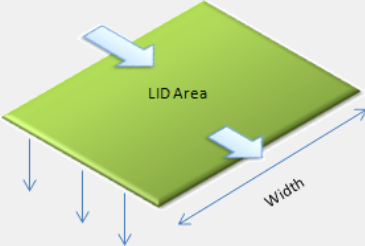
Surface	Soil	Storage	Drain
Thickness (in. or mm)	<input type="text" value="150"/>		
Void Ratio (Voids / Solids)	<input type="text" value="0.3"/>		
Seepage Rate (in/hr or mm/hr)	<input type="text" value="0"/>		
Clogging Factor	<input type="text" value="0"/>		

Surface	Soil	Storage	Drain
Flow Coefficient*		<input type="text" value="2.66"/>	
Flow Exponent		<input type="text" value="0.5"/>	
Offset Height (in. or mm)		<input type="text" value="150"/>	

[Drain Advisor](#)

\*Units are for flow in either in/hr or mm/hr; use 0 if there is no drain.

LID Control Name:



Detailed Report File (Optional)

☐ LID Occupies Full Subcatchment

Area of Each Unit (sq ft or sq m)

Number of Units

% of Subcatchment Occupied

Surface Width per Unit (ft or m)

% Initially Saturated

% of Impervious Area Treated

Send Drain Flow To:  
(Leave blank to use outlet of current subcatchment)

☐ Return all Outflow to Pervious Area

OK Cancel Help

**Figura 5-6:** Parámetros e información requerida para la alternativa de celdas de bioretención

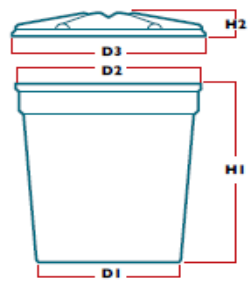
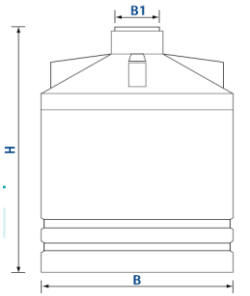
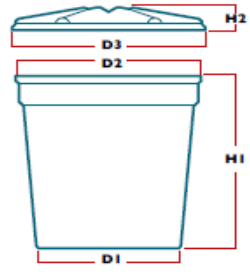
### 5.3.4 Parámetros de alternativas seleccionadas

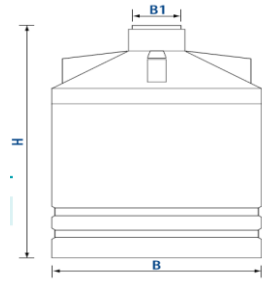
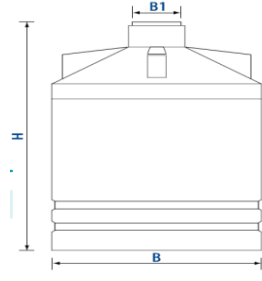
#### Depósitos de lluvia para 5 opciones (opción 1 a 5) con una (1) unidad de barril por techo

Según las tipologías de depósitos de lluvia que se pueden encontrar en el mercado y la facilidad para la ubicación e instalación en las viviendas y edificaciones, se determinó implementar 5 opciones de barriles de lluvia dentro de los escenarios para realizar las simulaciones en el modelo de SWMM. En la Tabla 5-2 se presentan las características de cada alternativa de depósito de lluvia tipo barril.

**Tabla 5-2:** Características barriles de lluvia para 5 opciones según capacidad

**Fuente:** (ACUAVIVA, 2019; ROTOPLAS, 2012)

<b>Opción 1: Tanque cónico de 500 litros</b>	<b>Acuaviva</b>	<b>unidad</b>	
Diámetro tanque	0.931	m	
Altura	0.934	m	
Capacidad	0.500	m3	
Diámetro orificio dren (1")	0.025	m	
Área superficial tanque	0.681	m2	
Área orificio dren	0.002	m2	
<b>Opción 2: Tanque de botella de 600 litros</b>	<b>Rotoplast</b>	<b>unidad</b>	
Diámetro tanque	0.919	m	
Altura	1.250	m	
Capacidad	0.600	m3	
Diámetro orificio dren (1")	0.025	m	
Área superficial tanque	0.663	m2	
Área orificio dren	0.002	m2	
<b>Opción 3: Tanque cónico de 1000 litros</b>	<b>Acuaviva</b>	<b>unidad</b>	
Diámetro tanque	1.232	m	
Altura	1.030	m	
Capacidad	1.000	m3	
Diámetro orificio dren (1")	0.025	m	
Área superficial tanque	1.192	m2	
Área orificio dren	0.002	m2	

<b>Opción 4: Tanque de botella de 1100 litros</b>	<b>Rotoplast</b>	<b>unidad</b>	
Diámetro tanque	1.090	m	
Altura	1.380	m	
Capacidad	1.100	m3	
Diámetro orificio dren (1")	0.025	m	
Área superficial tanque	0.933	m2	
Área orificio dren	0.002	m2	
<b>Opción 5: Tanque de botella de 2000 litros</b>	<b>Rotoplast</b>	<b>unidad</b>	
Diámetro tanque	1.360	m	
Altura	1.670	m	
Capacidad	2.000	m3	
Diámetro orificio dren (1")	0.025	m	
Área superficial tanque	1.453	m2	
Área orificio dren	0.002	m2	

Los parámetros de las 5 opciones de barriles de lluvia para la evaluación de SWMM se muestran en la Tabla 5-3.

**Tabla 5-3:** Parámetros de barriles de lluvia para aplicación en SWMM

Parámetro	Opción 1- 500 l	Opción 2- 600 l	Opción 3- 1000 l	Opción 4- 1100 l	Opción 5 2000 l
Altura del tanque (mm)	934	1250	1030	1380	1670
Coeficiente de caudal (C) mm/h	0.2243	0.2302	0.1281	0.1636	0.1051
Exponente de caudal (n) (mm)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Altura del dren (mm)	934	1250	1030	1380	1670
Periodo de retención (h)	1	1	1	1	1
Área de cada unidad (m <sup>2</sup> )	0.681	0.663	1.192	0.933	1.453

La descripción de los parámetros presentados en la Tabla 5-3 se presenta a continuación:

- Altura del tanque: se asigna el valor según ficha técnica comercial del tanque considerado.
- Coeficiente de caudal (C) y Exponente de caudal (n):  
Estos parámetros determinan el flujo por unidad de área en función de la altura de agua almacenada en la capa de almacenamiento por encima de la tubería de drenaje.

- Coeficiente de caudal (C): para obtener el valor de (C) presentado en la Tabla 5-3, se aplica la siguiente ecuación:

$$C = 4.8 * (D_1/D_2)^2 * 62.768$$

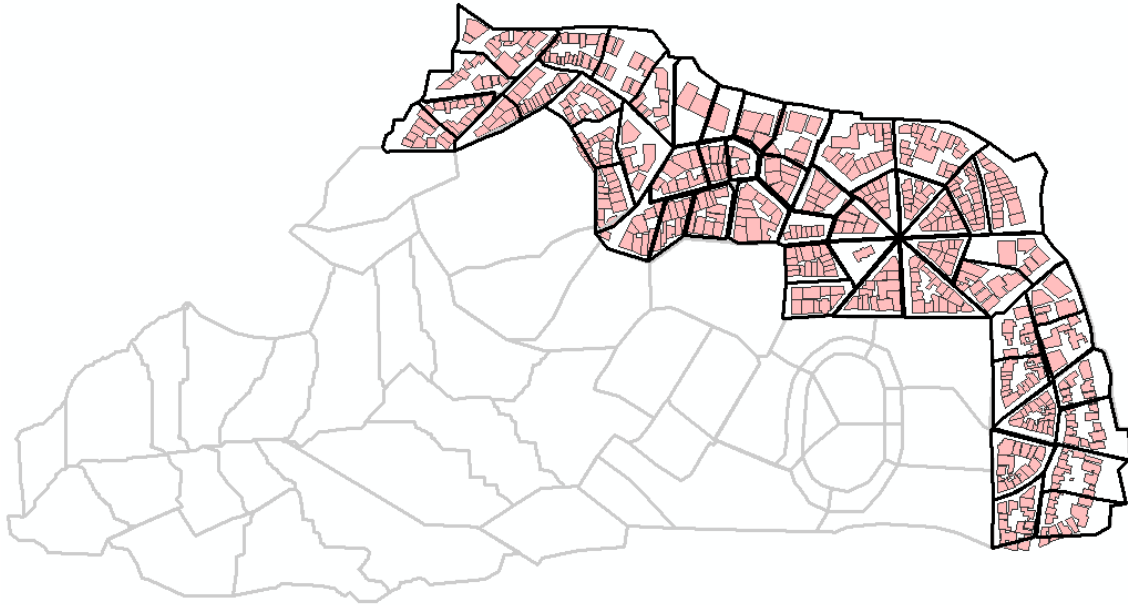
Ecuación 5-1

En la Ecuación 5-1,  $D_1$  corresponde al diámetro del orificio de salida del Drenaje y  $D_2$  al diámetro del tanque.

- Exponente de caudal (n): de acuerdo con (L. A. Rossman, 2015), se plantea un valor de 0.5 para n (haciendo que el drenaje actúe como un orificio).
- Altura del dren: esta es la altura de la línea de drenaje sobre el fondo de una capa de almacenamiento o barril de lluvia (L. A. Rossman, 2015).
- Periodo de retención: el periodo de retención es el tiempo que demora el flujo para evacuar el volumen almacenado después de que termine la lluvia. Si se establece como 0 horas, se considera que la línea de drenaje está siempre abierta (L. A. Rossman, 2015).
- Área de cada unidad: se asigna el valor obtenido con el diámetro según ficha técnica comercial del tanque considerado.

Los anteriores parámetros son ingresados para cada una de los SUDS en la opción “LID Control” de la función “Hidrology” de SWMM. Posteriormente, se debe ingresar el número de unidades de barriles en cada subcuenca. Adicionalmente, se requiere calcular el área impermeable tratada en cada subcuenca, que corresponde al área total de los techos de viviendas y edificaciones en los que se aplicarán los barriles de lluvia. Para determinar el número y área de techos en cada subcuenca, (Rey Valencia, 2019) realizó el cálculo mediante fotografía aérea y la herramienta Open Layer del aplicativo QGIS (QGIS development team, 2017).

Contando con la anterior información, se ajustaron los techos para cada subcuenca obtenida en la nueva discretización según como se observa en la Figura 5-7.



**Figura 5-7:** Distribución de techos para determinar unidades de barriles de lluvia

Para la aplicación de los barriles de lluvia, se determinaron 54 subcuencas ubicadas en la zona alta de la cuenca, para cada una de ellas se obtuvo la cantidad de techos, área unitaria y área total de techos por subcuenca. Con la anterior información, se determinó el primer escenario estableciendo el número de unidades de barriles por techo (1 unidad por techo), el porcentaje de área impermeable tratada en cada subcuenca y el porcentaje de área ocupada del grupo de barriles al aplicarlos en cada subcuenca. A continuación, se muestra la Tabla 5-4 con los parámetros para las subcuencas donde se aplicaron los barriles de lluvia como alternativa SUDS:

**Tabla 5-4:** Parámetros de subcuencas para la aplicación en SWMM

Subcuenca	Área SC (ha)	# de unidades por SC Un	% de área impermeable tratada %	% ocupado de la subcuenca				
				500 l	600 l	1000 l	1100 l	2000 l
SC_0.1	0.733	11	48.13	0.102	0.099	0.179	0.140	0.218
SC_0.2	0.586	9	30.51	0.105	0.102	0.183	0.143	0.223
SC_1.1	0.497	22	65.33	0.301	0.294	0.528	0.413	0.643
SC_1.2	0.713	8	29.54	0.076	0.074	0.134	0.105	0.163
SC_10.1	0.320	11	63.98	0.234	0.228	0.409	0.320	0.499
SC_10.2	0.323	9	51.66	0.189	0.185	0.332	0.260	0.404
SC_10.3	0.345	13	58.64	0.256	0.250	0.449	0.351	0.547

SC_11.1	0.366	8	56.70	0.149	0.145	0.261	0.204	0.318
SC_11.2	0.354	7	61.83	0.135	0.131	0.236	0.184	0.287
SC_11.3	0.280	7	31.18	0.170	0.166	0.298	0.233	0.363
SC_12.1	0.705	13	31.13	0.126	0.122	0.220	0.172	0.268
SC_12.2	0.582	10	44.30	0.117	0.114	0.205	0.160	0.249
SC_12.3	0.478	11	60.29	0.157	0.153	0.274	0.215	0.334
SC_12.4	0.598	14	53.67	0.159	0.155	0.279	0.218	0.340
SC_13.1	0.476	5	41.36	0.072	0.070	0.125	0.098	0.153
SC_13.2	0.535	13	39.27	0.165	0.161	0.290	0.227	0.353
SC_13.3	0.473	7	37.91	0.101	0.098	0.176	0.138	0.215
SC_13.4	0.475	5	48.73	0.072	0.070	0.125	0.098	0.153
SC_14.1	0.569	9	58.66	0.108	0.105	0.189	0.148	0.230
SC_14.2	0.649	5	35.47	0.052	0.051	0.092	0.072	0.112
SC_14.3	0.328	11	63.20	0.229	0.223	0.400	0.313	0.488
SC_14.4	0.687	19	54.92	0.188	0.184	0.330	0.258	0.402
SC_15.1	0.331	1	18.36	0.021	0.020	0.036	0.028	0.044
SC_15.2	0.548	12	62.94	0.149	0.145	0.261	0.204	0.318
SC_15.3	0.430	9	63.02	0.142	0.139	0.249	0.195	0.304
SC_15.4	0.407	16	72.10	0.268	0.261	0.469	0.367	0.571
SC_2.1	0.461	15	63.15	0.222	0.216	0.388	0.304	0.473
SC_2.2	0.314	7	59.29	0.152	0.148	0.266	0.208	0.324
SC_25.1	0.625	5	36.33	0.054	0.053	0.095	0.075	0.116
SC_25.2	0.479	7	44.37	0.099	0.097	0.174	0.136	0.212
SC_3.1	0.471	16	48.44	0.231	0.226	0.405	0.317	0.494
SC_3.2	0.373	14	57.67	0.256	0.249	0.448	0.351	0.546
SC_3.3	0.415	15	66.22	0.246	0.240	0.431	0.338	0.525
SC_32.1	0.464	8	33.44	0.117	0.114	0.205	0.161	0.250
SC_32.2	0.642	11	29.97	0.117	0.114	0.204	0.160	0.249
SC_32.3	0.442	18	49.32	0.277	0.270	0.485	0.380	0.591
SC_33.1	0.365	13	63.14	0.242	0.236	0.424	0.332	0.517
SC_33.2	0.464	9	49.12	0.132	0.129	0.231	0.181	0.281
SC_4.1	0.571	2	37.15	0.024	0.023	0.042	0.033	0.051
SC_4.2	0.383	4	63.58	0.071	0.069	0.124	0.097	0.152
SC_4.3	0.533	6	53.87	0.077	0.075	0.134	0.105	0.163
SC_4.4	0.318	7	78.73	0.150	0.146	0.262	0.205	0.319
SC_4.5	0.294	1	41.94	0.023	0.023	0.041	0.032	0.049
SC_5.1	0.434	8	63.58	0.126	0.122	0.220	0.172	0.268
SC_5.2	0.205	6	74.11	0.200	0.195	0.350	0.274	0.426
SC_5.3	0.213	4	56.80	0.128	0.124	0.224	0.175	0.272
SC_6.1	0.482	8	54.11	0.113	0.110	0.198	0.155	0.241
SC_6.2	0.284	8	76.82	0.191	0.187	0.335	0.262	0.409
SC_6.3	0.409	11	69.38	0.183	0.179	0.321	0.251	0.391
SC_6.4	0.580	10	65.19	0.117	0.114	0.205	0.161	0.250
SC_7	0.986	17	48.00	0.117	0.114	0.206	0.161	0.251
SC_8	0.871	17	43.05	0.133	0.130	0.233	0.182	0.284
SC_9.1	0.405	19	65.89	0.319	0.311	0.559	0.438	0.682
SC_9.2	0.968	18	34.12	0.127	0.123	0.222	0.173	0.270

Los anteriores parámetros son ingresados en la opción “LID controls” dentro de las propiedades de cada subcuenca en SWMM con el fin de realizar la simulación.

El desempeño hidráulico de los SUDS será evaluado por medio de los siguientes criterios: disminución de los caudales punta, disminución de los volúmenes de inundación en las cámaras y disminución del tiempo de inundación en la red.

### **Depósitos de lluvia para 2 opciones complementarias (opción 6 y 7) con varias unidades de barril por techo**

El número de techos considerados para implementar los barriles de lluvia fue de 549 unidades, distribuido en 54 subcuencas, con áreas entre 15.63 y 922.27 m<sup>2</sup> como se observa en la Tabla 5-5:

**Tabla 5-5:** Cantidad de techos según área

Cantidad total de techos considerados (un)	549	
Área (m <sup>2</sup> )	Promedio	220.32
	Menor	15.63
	Mayor	922.27

Los techos elegidos en la zona alta de la cuenca, para cada una de las subcuencas, se clasificaron según su área desde menores a 100 m<sup>2</sup> hasta mayores a 300 m<sup>2</sup>, en rangos de 50 m<sup>2</sup>. Posteriormente se determina el número de barriles según el área de cada techo. Lo anterior se observa en Tabla 5-6:

**Tabla 5-6:** Asignación de unidades de barriles según clasificación de techos por área

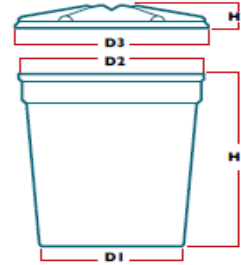
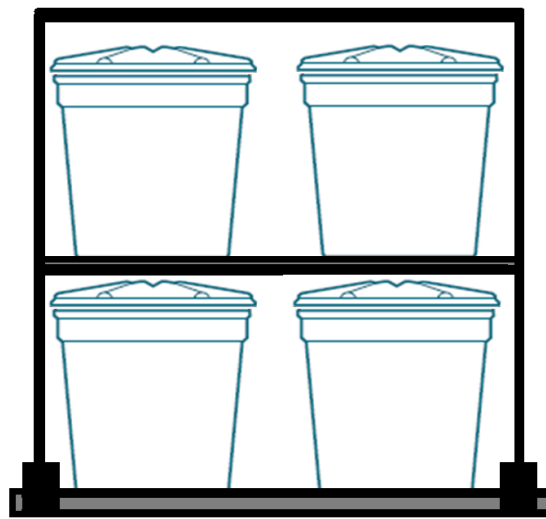
Rango de área (m <sup>2</sup> )	Cantidad de techos por área (un)	Número de unidades de barriles propuesta por techo Según el área (Un)
< 100 m <sup>2</sup>	60	2
100 y 150 m <sup>2</sup>	117	3
150 y 200 m <sup>2</sup>	136	4
200 y 250 m <sup>2</sup>	80	6
250 y 300 m <sup>2</sup>	58	7
> 300 m <sup>2</sup>	98	7



### Opción 6: barriles de 1000 litros, en 2 niveles

En la Tabla 5-7, se presentan las características del barril de 1000 litros como opción 6 a implementar teniendo en cuenta la distribución considerada en 2 niveles.

**Tabla 5-7:** Características para barril de 1000 litros con distribución en 2 niveles

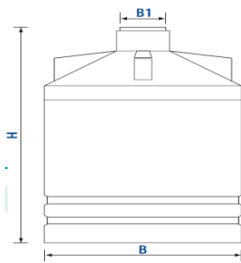
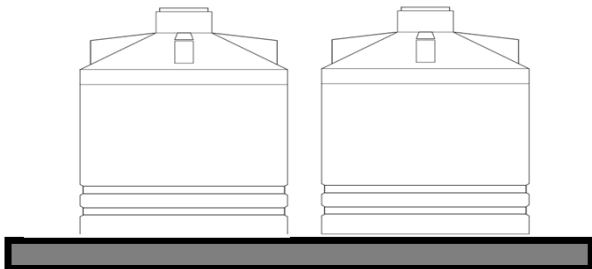
Opción 6: Tanque cónico de 1000 litros			Acuaviva	unidad	
Diámetro tanque	1.232	m			
Altura	1.030	m			
Capacidad	1000	m3			
Diámetro orificio dren (1")	0.025	m			
Área superficial tanque	1.192	m2			
Área orificio dren	0.002	m2			
Distribución tipo					

Una vez determinado el número de barriles por cada unidad de techo, según el rango de área definida, se configura el modelo SWMM incrementando la altura de los tanques de 1.030 metros a 2.060 metros en la opción "Hidrology". Posteriormente se configura cada subcuenca con el número de barriles según el área en la opción "Lid control".

### Opción 7: barriles de 2000 litros, en 1 nivel

En la Tabla 5-8, se presentan las características del barril de 2000 litros como nueva opción a implementar y la distribución considerada en 1 nivel.

**Tabla 5-8:** Características para barril de 2000 litros con distribución en 1 sólo nivel

Opcción 7: Tanque de botella de 2000 litros	Rotoplast	unidad	
Diámetro tanque	1.360	m	
Altura	1.670	m	
Capacidad	2.000	m3	
Diámetro orificio dren (1")	0.025	m	
Área superficial tanque	1.453	m2	
Área orificio dren	0.002	m2	
Distribución tipo			

Para el caso de la opción 7, igualmente se determina el número de barriles por cada unidad de techo, según el rango de área definida. Esta vez, se configura el modelo SWMM con una sola altura de tanque igual a 1.670 metros en la opción “Hidrology”. Posteriormente se configura cada subcuenca con el número de barriles según el área en la opción “Lid control”.

Aplicando el anterior criterio, el número de unidades de barriles por subcuenca quedaría según se muestra en la Tabla 5-9:

**Tabla 5-9:** Unidades de barriles consideradas inicialmente y después según cantidad propuesta

	Área SC	# de unidades consideradas inicialmente por SC	# de unidades por SC según opción 6	# de unidades por SC según opción 7	% de área impermeable tratada
Subcuenca	(ha)	Un.	Un.	Un.	%
SC_0.1	0.733	11	126	63	48.13
SC_0.2	0.586	9	90	45	30.51
SC_1.1	0.497	22	144	72	65.33
SC_1.2	0.713	8	92	46	29.54
SC_10.1	0.320	11	88	44	63.98
SC_10.2	0.323	9	72	36	51.66
SC_10.3	0.345	13	96	48	58.64
SC_11.1	0.366	8	86	43	56.70
SC_11.2	0.354	7	84	42	61.83
SC_11.3	0.280	7	40	20	31.18
SC_12.1	0.705	13	104	52	31.13
SC_12.2	0.582	10	104	52	44.30

SC_12.3	0.478	11	110	55	60.29
SC_12.4	0.598	14	134	67	53.67
SC_13.1	0.476	5	62	31	41.36
SC_13.2	0.535	13	100	50	39.27
SC_13.3	0.473	7	82	41	37.91
SC_13.4	0.475	5	62	31	48.73
SC_14.1	0.569	9	110	55	58.66
SC_14.2	0.649	5	68	34	35.47
SC_14.3	0.328	11	88	44	63.20
SC_14.4	0.687	19	168	84	54.92
SC_15.1	0.331	1	14	7	18.36
SC_15.2	0.548	12	132	66	62.94
SC_15.3	0.430	9	110	55	63.02
SC_15.4	0.407	16	130	65	72.10
SC_2.1	0.461	15	118	59	63.15
SC_2.2	0.314	7	80	40	59.29
SC_25.1	0.625	5	68	34	36.33
SC_25.2	0.479	7	80	40	44.37
SC_3.1	0.471	16	96	48	48.44
SC_3.2	0.373	14	92	46	57.67
SC_3.3	0.415	15	122	61	66.22
SC_32.1	0.464	8	70	35	33.44
SC_32.2	0.642	11	92	46	29.97
SC_32.3	0.442	18	98	49	49.32
SC_33.1	0.365	13	102	51	63.14
SC_33.2	0.464	9	96	48	49.12
SC_4.1	0.571	2	28	14	37.15
SC_4.2	0.383	4	56	28	63.58
SC_4.3	0.533	6	84	42	53.87
SC_4.4	0.318	7	92	46	78.73
SC_4.5	0.294	1	14	7	41.94
SC_5.1	0.434	8	102	51	63.58
SC_5.2	0.205	6	70	35	74.11
SC_5.3	0.213	4	56	28	56.80
SC_6.1	0.482	8	96	48	54.11
SC_6.2	0.284	8	96	48	76.82
SC_6.3	0.409	11	136	68	69.38
SC_6.4	0.580	10	128	64	65.19
SC_7	0.986	17	180	90	48.00
SC_8	0.871	17	134	67	43.05
SC_9.1	0.405	19	128	64	65.89
SC_9.2	0.968	18	150	75	34.12

## Depósitos de lluvia con varias unidades de barriles por techo y celdas de bioretención (opción 8)

Para esta alternativa se tendrán en cuenta Barriles de lluvia de 1000 litros en 2 niveles y los sistemas de Celdas de bioretención, cuyas características se presentan a continuación:

### Barriles de 1000 litros, en 2 niveles

Se tendrán las mismas consideraciones para los barriles de 1000 litros en 2 niveles determinadas en la opción 6, siendo estas:

- Parámetros (Tabla 5-3)
- Número de barriles según clasificación de techos por área (Tabla 5-6)
- Características del barril y su distribución (Tabla 5-7)
- Unidades de barriles para cada subcuenca (Tabla 5-9)
- Igualmente, para las unidades de barriles se usará el mismo número aplicado en la opción 6, tal como se muestra en la Tabla 5-10:

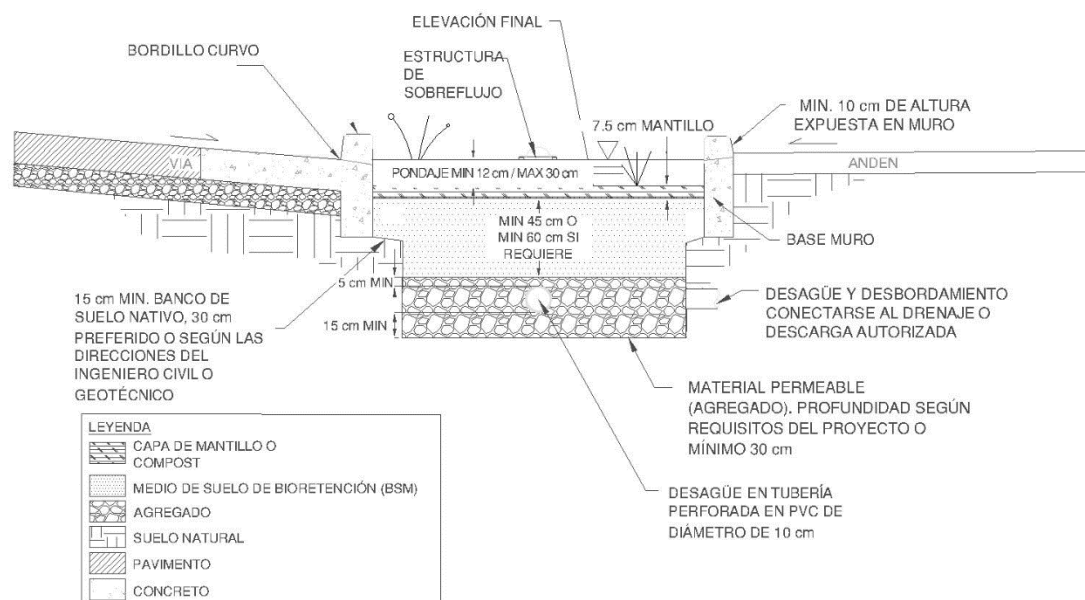
**Tabla 5-10:** Unidades de barriles consideradas en opción 8

Subcuenca	Área SC (ha)	# de unidades por SC para opción 8	% de área impermeable tratada %
SC_0.1	0.733	126	48.13
SC_0.2	0.586	90	30.51
SC_1.1	0.497	144	65.33
SC_1.2	0.713	92	29.54
SC_10.1	0.320	88	63.98
SC_10.2	0.323	72	51.66
SC_10.3	0.345	96	58.64
SC_11.1	0.366	86	56.70
SC_11.2	0.354	84	61.83
SC_11.3	0.280	40	31.18
SC_12.1	0.705	104	31.13
SC_12.2	0.582	104	44.30
SC_12.3	0.478	110	60.29
SC_12.4	0.598	134	53.67
SC_13.1	0.476	62	41.36
SC_13.2	0.535	100	39.27
SC_13.3	0.473	82	37.91
SC_13.4	0.475	62	48.73
SC_14.1	0.569	110	58.66
SC_14.2	0.649	68	35.47
SC_14.3	0.328	88	63.20
SC_14.4	0.687	168	54.92
SC_15.1	0.331	14	18.36
SC_15.2	0.548	132	62.94
SC_15.3	0.430	110	63.02
SC_15.4	0.407	130	72.10
SC_2.1	0.461	118	63.15
SC_2.2	0.314	80	59.29
SC_25.1	0.625	68	36.33
SC_25.2	0.479	80	44.37
SC_3.1	0.471	96	48.44
SC_3.2	0.373	92	57.67

SC_3.3	0.415	122	66.22
SC_32.1	0.464	70	33.44
SC_32.2	0.642	92	29.97
SC_32.3	0.442	98	49.32
SC_33.1	0.365	102	63.14
SC_33.2	0.464	96	49.12
SC_4.1	0.571	28	37.15
SC_4.2	0.383	56	63.58
SC_4.3	0.533	84	53.87
SC_4.4	0.318	92	78.73
SC_4.5	0.294	14	41.94
SC_5.1	0.434	102	63.58
SC_5.2	0.205	70	74.11
SC_5.3	0.213	56	56.80
SC_6.1	0.482	96	54.11
SC_6.2	0.284	96	76.82
SC_6.3	0.409	136	69.38
SC_6.4	0.580	128	65.19
SC_7	0.986	180	48.00
SC_8	0.871	134	43.05
SC_9.1	0.405	128	65.89
SC_9.2	0.968	150	34.12

### Celdas de bioretención

En la Figura 5-8, se muestran en pulgadas, los rangos de las diferentes capas y elementos que se deben tener en cuenta para determinar las características y parámetros de las Celdas de bioretención como alternativa de SUDS a incorporar en las evaluaciones.



**Figura 5-8:** Detalle de características en celdas de bioretención. Adaptado de (CASQA, 2017)

**Parámetros en Celdas de bioretención**

En la Tabla 5-11, se presentan los parámetros para configurar el modelo para la alternativa de celdas de bioretención:

**Tabla 5-11:** Parámetros considerados para celdas de bioretención en opción 8

<b>LID control editor</b>		
Surface	Berm Height (mm)	200
	Vegetation volume fraction	0.2
	Surface roughness	0.4
	Surface slope	4
Soil	Thickness (mm)	600
	Porosity	0.5
	Field capacity	0.2
	Wilting point	0.1
	Conductivity (mm/h)	65
	Conductivity slope	0
	Suction head (mm)	165
Storage	Thickness (mm)	300
	Void ratio	0.7
	Seepage rate (mm/h)	0
	Clogging factor	0
Drain	Flow coefficient	2.66
	Flow exponent	0.5
	Offset of height	250
Area impermeable tratada(m2)		Según/SC
<b>LID usage editor</b>		
	Area of each unit (m <sup>2</sup> )	2.4
	Number of units	Según/SC
	Surface width per unit (m)	0.8
	% initially saturated	50
	% impervious area treated	Según/SC
	Send drain flow to	blank

### Subcuencas donde se aplicará la Opción 8

En la Tabla 5-12, se observa la información de las subcuencas donde se aplicará la opción 8:

**Tabla 5-12:** Información de barriles y celdas de bioretención en opción 8

	Área SC	# de unidades de barriles por SC	% de área impermeable tratada para barriles	Longitud para aplicar bioceldas por SC	Área impermeable tratada por SC	% de área impermeable tratada para bioceldas	# de unidades de bioceldas de 2.4 m por SC
Subcuenca	(ha)	Un.	%	m	m <sup>2</sup>	%	Un.
SC_0.1	0.733	126	48.13	56	201.6	2.96	24
SC_0.2	0.586	90	30.51				
SC_1.1	0.497	144	65.33				
SC_1.2	0.713	92	29.54				
SC_10.1	0.32	88	63.98				
SC_10.2	0.323	72	51.66				
SC_10.3	0.345	96	58.64				
SC_11.1	0.366	86	56.7				
SC_11.2	0.354	84	61.83				
SC_11.3	0.28	40	31.18				
SC_12.1	0.705	104	31.13	121	435.6	6.72	51
SC_12.2	0.582	104	44.3				
SC_12.3	0.478	110	60.29	121	435.6	10.23	51
SC_12.4	0.598	134	53.67	110	396	7.19	46
SC_13.1	0.476	62	41.36				
SC_13.2	0.535	100	39.27				
SC_13.3	0.473	82	37.91				
SC_13.4	0.475	62	48.73				
SC_14.1	0.569	110	58.66				
SC_14.2	0.649	68	35.47				
SC_14.3	0.328	88	63.2				
SC_14.4	0.687	168	54.92				
SC_15.1	0.331	14	18.36				
SC_15.2	0.548	132	62.94				
SC_15.3	0.43	110	63.02				
SC_15.4	0.407	130	72.1	195.5	703.8	17.65	82
SC_2.1	0.461	118	63.15	319.4	1149.84	29.35	134
SC_2.2	0.314	80	59.29	98.5	354.6	12.99	42
SC_25.1	0.625	68	36.33	145	522	9.38	61
SC_25.2	0.479	80	44.37				
SC_3.1	0.471	96	48.44	160	576	13.83	67

SC_3.2	0.373	92	57.67	64.5	232.2	7	27
SC_3.3	0.415	122	66.22	86.7	312.12	8.36	37
SC_32.1	0.464	70	33.44	38.1	137.16	3.05	16
SC_32.2	0.642	92	29.97				
SC_32.3	0.442	98	49.32	80	288	6.71	34
SC_33.1	0.365	102	63.14				
SC_33.2	0.464	96	49.12	96.8	348.48	8.31	41
SC_4.1	0.571	28	37.15				
SC_4.2	0.383	56	63.58	90.6	326.16	9	38
SC_4.3	0.533	84	53.87				
SC_4.4	0.318	92	78.73				
SC_4.5	0.294	14	41.94				
SC_5.1	0.434	102	63.58				
SC_5.2	0.205	70	74.11	53.9	194.04	9.68	23
SC_5.3	0.213	56	56.8				
SC_6.1	0.482	96	54.11				
SC_6.2	0.284	96	76.82				
SC_6.3	0.409	136	69.38				
SC_6.4	0.58	128	65.19				
SC_7	0.986	180	48				
SC_8	0.871	134	43.05				
SC_9.1	0.405	128	65.89				
SC_9.2	0.968	150	34.12				
Zona 1			Zona 3				
Zona 2			Zona 4				

### Enfoques para evaluar depósitos de lluvia con varias unidades de barriles por techo y celdas de bioretención (opción 8)

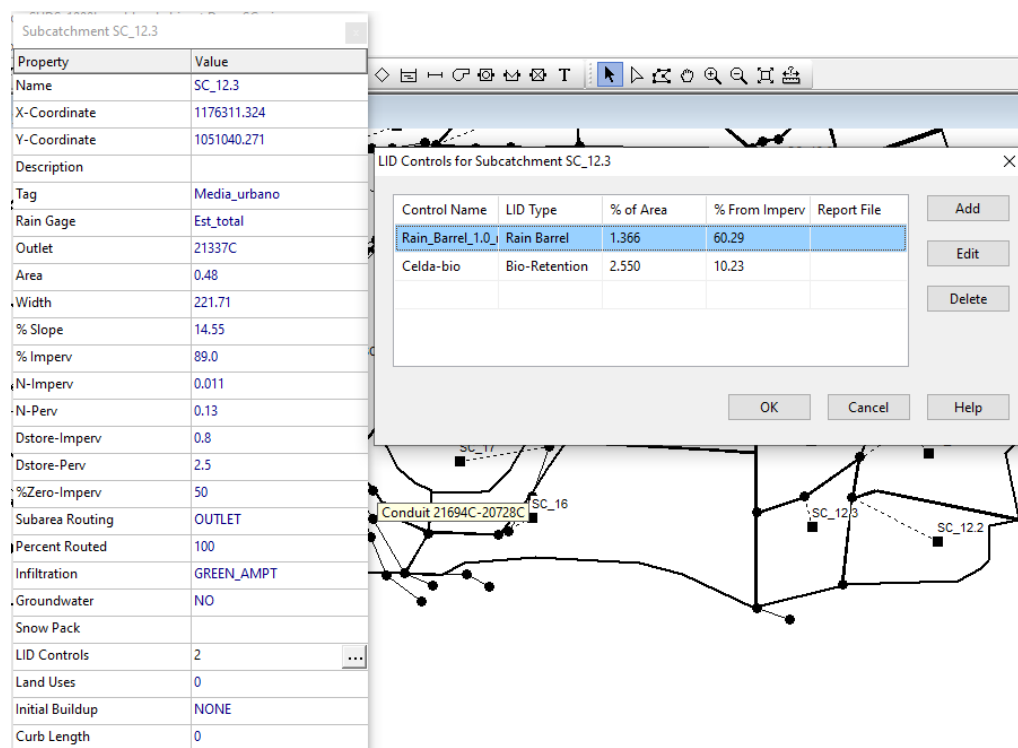
Con el propósito de conocer el comportamiento de la opción 8 mediante las funciones y aplicaciones que permite el modelo de SWMM para la descarga de las diferentes subcuencas, se plantean 2 enfoques para la implementación de los barriles de lluvia y las celdas de bioretención:

- Como primera medida, para cada subcuenca en la que se pretender aplicar la opción 8, se busca determinar e incorporar tanto los barriles de lluvia de 1000 litros en 2 niveles, como las celdas de bioretención en la misma subcuenca y cámara de descarga configurada inicialmente en el modelo, definiendo además para cada



opción de SUDS sus respectivos parámetros y condiciones requeridos por el programa.

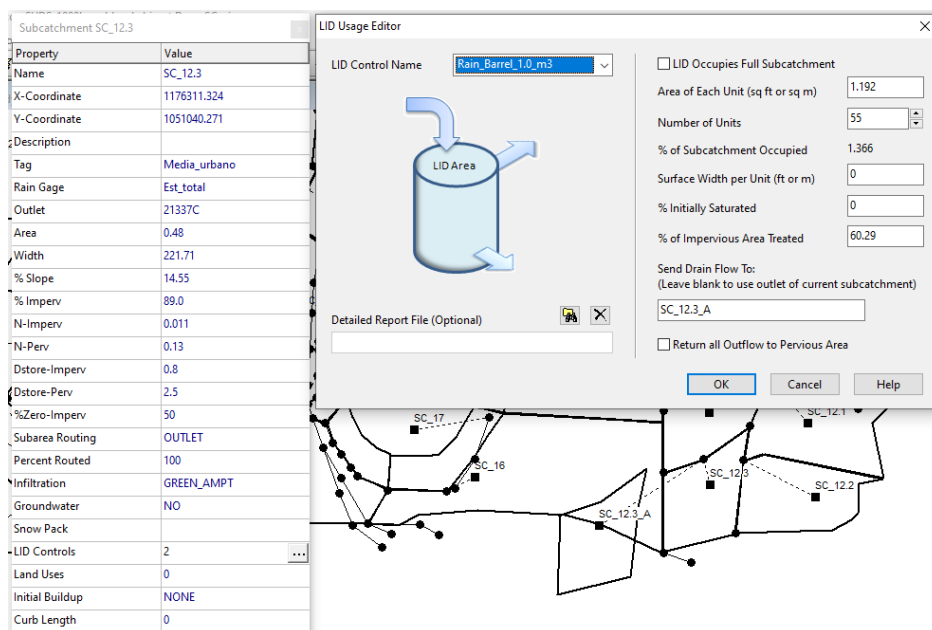
En la Figura 5-9, se muestra la configuración inicial que se pretende adelantar con el primer enfoque en la opción de la subcuenca “LID usage editor”:



**Figura 5-9:** Configuración inicial de los SUDS en primer enfoque

- Por otra parte, como segundo enfoque, se busca conocer el comportamiento de las subcuencas descargando el flujo de drenaje de los barriles de lluvia a una nueva subcuenca, configurada de tal forma que tenga características similares al SUDS de celdas de bioretención y ambas compartan la cámara de salida.

En la Figura 5-10 se observa el ejemplo con la configuración de la subcuenca adicional que trabajará como SUDS y a la cual drenarán los barriles de lluvia.



**Figura 5-10:** Configuración inicial de los SUDS en segundo enfoque

### **5.3.5 Evaluación hidráulica de los SUDS para 5 opciones de barriles de lluvia aplicados en las zonas críticas**

Después de haber ingresado los parámetros de los barriles de lluvia y la información de cada subcuenca, se corrió el modelo para conocer el comportamiento considerando las 5 opciones de tanques de 500, 600, 1000, 1100 y 2000 litros, para cada una de las 4 zonas identificadas como críticas cuya evaluación se realizó comparando los resultados a través de su relación con el modelo sin SUDS.

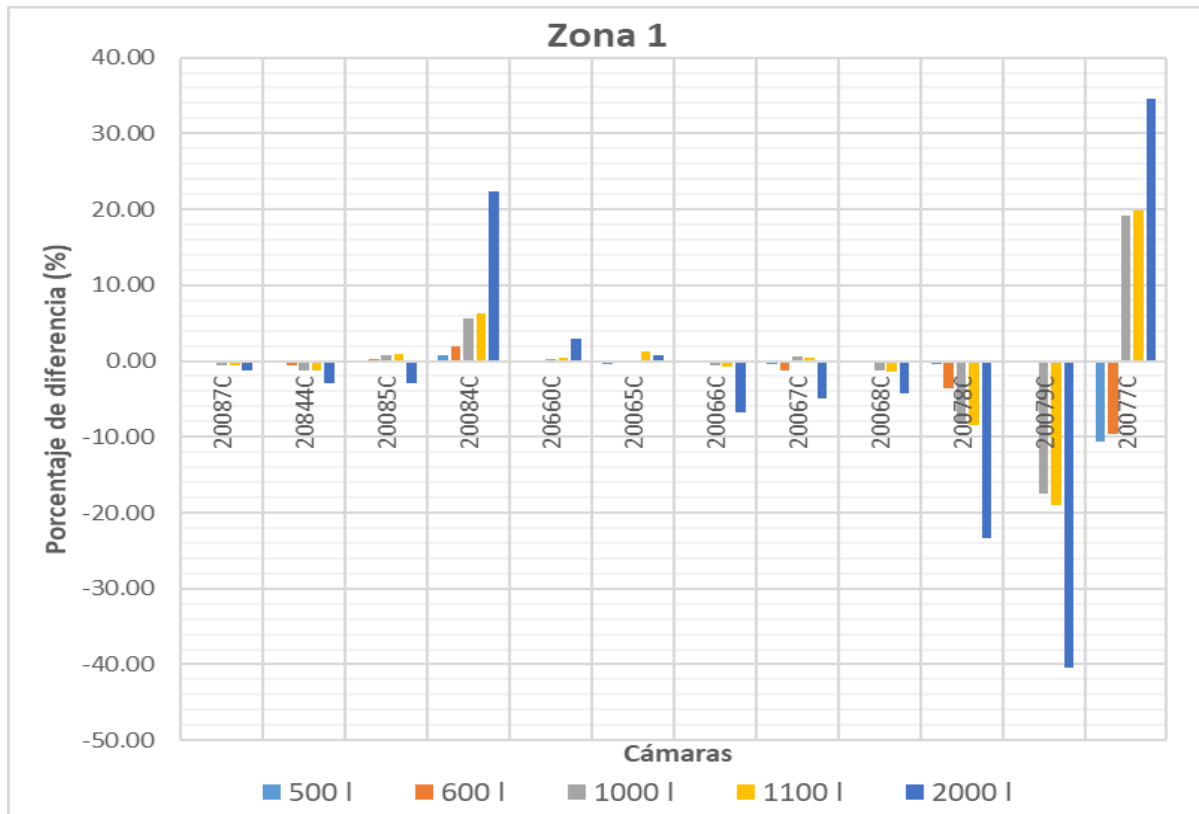
Una vez adelantadas las simulaciones sin SUDS y con SUDS, se tomó el minuto 30 como momento crítico para analizar el comportamiento hidráulico para la cuenca de estudio.

- **Variación de porcentaje de caudales de inundación para las 5 opciones de barriles aplicados en las zonas críticas**

Los caudales máximos de inundación que ocurren en cada cámara para cada opción con SUDS fueron comparados con los obtenidos en la simulación sin SUDS y los resultados se muestran en la Figura 5-11, Figura 5-12, Figura 5-13 y Figura 5-14, representando respectivamente a las zonas 1, 2, 3 y 4 (valores positivos indican disminución de los caudales punta, mientras que valores negativos incrementos). Observando el comportamiento en cada una de las figuras, se puede concluir que en cada una de las zonas donde fueron aplicadas las 5 opciones con barriles de lluvia, los resultados no son los esperados para los caudales punta ya que no logra la atenuación esperada. Por otro lado, en algunas cámaras, se observan diferencias altas de porcentajes que pueden representar un comportamiento satisfactorio según cada ilustración.

#### **Zona 1**

En la Figura 5-11 se observa la variación en porcentaje de los caudales de inundación para la zona 1, considerando las simulaciones de las 5 opciones de barriles.

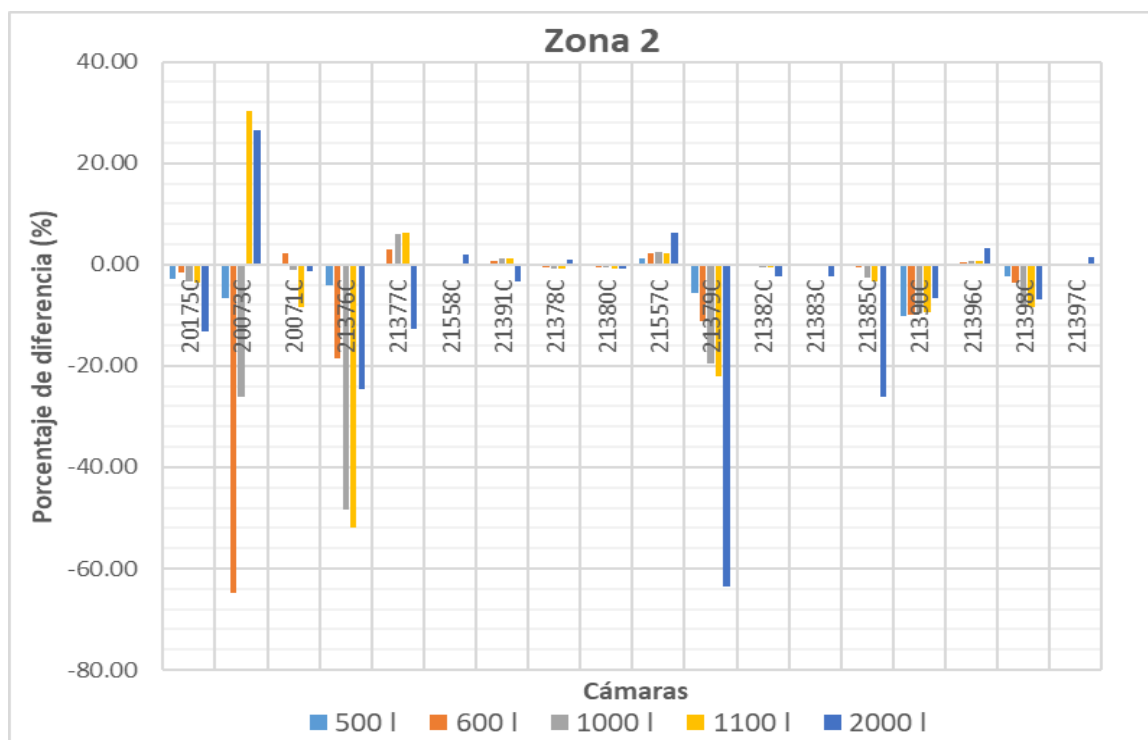


**Figura 5-11:** Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 1

De acuerdo con lo observado en la Figura 5-11, se aprecia una mayor variación del porcentaje en los caudales de inundación para las cámaras 20084C y 20077C, con valores de atenuación de 22.32 y 34.60 %, para la opción 5. En menor medida se presentaron variaciones de porcentaje en al menos una opción de barril de lluvia, en las cámaras 20085C, 20660C, 20065C y 20067C. Por otro lado, y observando resultados que no presentan un buen funcionamiento de los depósitos, se observan las cámaras 20087C, 20844C, 20066C, 20068C, 20078C y 20079C, donde los porcentajes de variación fueron negativos para las simulaciones de las 5 opciones de barriles. En resumen, en términos generales se consigue poca mitigación de los caudales punta en la mayoría de las cámaras, a excepción de dos cámaras dónde se logran reducciones importantes, en la primera para las 5 opciones de barriles y en la segunda para 3 de estas. Es notable cómo en dos cámaras los caudales punta se incrementan notablemente. Otro efecto inusual es que los tanques más grandes tienden a causar incrementos en dichos caudales punta, especialmente el de 2000 l (barra azul fuerte).

## Zona 2

La variación en porcentaje de los caudales de inundación para la zona 2, se observa en la Figura 5-12 considerando las simulaciones de las 5 opciones de barriles.

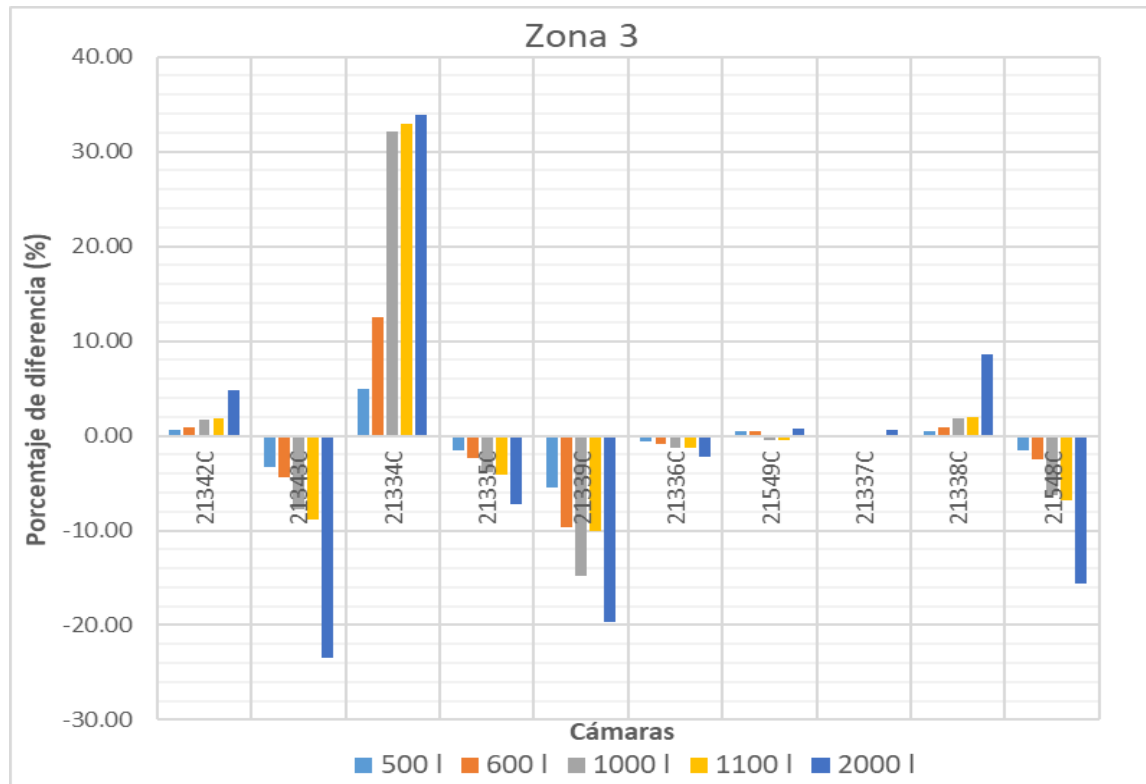


**Figura 5-12:** Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 2

En la Figura 5-12 se aprecia una reducción de los caudales según la variación para la cámara 20073C, para las opciones 4 y 5, con porcentajes de 30.36 y 26.55 % respectivamente. Por otro lado, se presenta reducción de caudales de inundación al menos de una opción de barril de lluvia en las cámaras 20071C, 21377C, 21558C y 21391C, 21378C, 21557C, 21396C y 21397C. Por otra parte, se observan resultados que no muestran un buen funcionamiento de los depósitos, en las cámaras 20175C, 21376C, 21380C, 21379C, 21382C, 21383C, 21385C, 21390C, 21398C donde los porcentajes de variación fueron negativos para las simulaciones de las 5 opciones de barriles. El comportamiento es similar a lo observado en la zona 1, pero agudizado. Es decir, sólo se consigue un decremento significativo en una de las cámaras, y leve en 4 de las cámaras. Pero se obtienen incrementos de los caudales punta en 4 cámaras, y nuevamente se destacan los barriles de mayor tamaño como impulsores de dichos incrementos.

### Zona 3

Para la zona 3, la variación en porcentaje de los caudales de inundación para las 5 opciones de barriles, se observa en la Figura 5-13.

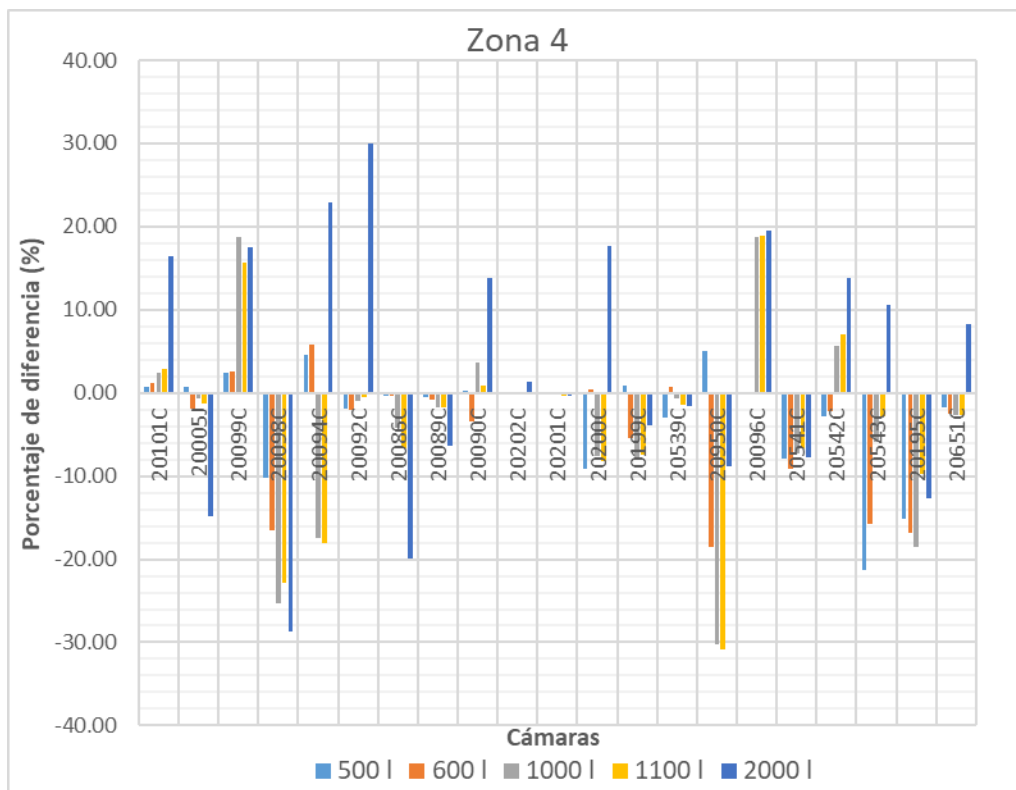


**Figura 5-13:** Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 3

Según se observa la Figura 5-13, se presenta una mayor reducción de los caudales de inundación de acuerdo con la variación del porcentaje para las 5 opciones de barriles en la cámara 21334C, con valores de 4.88, 12.50, 32.15, 32.97 y 33.86 % respectivamente. En menor medida se presentan variaciones de porcentaje en al menos una opción de barril de lluvia, en las cámaras 21342C, 21549C, 21337C, y 21338C. Por otro lado, observando resultados que no presentan un buen funcionamiento de los depósitos, se tienen las cámaras 21343C, 21335C, 21339C, 21336C y 21548C donde los porcentajes de variación fueron negativos para las simulaciones de las 5 opciones de barriles. De manera que, igual que para las otras zonas, el resultado es desfavorable ya que se consigue un decremento significativo en los caudales punta, solamente en 1 cámara, y leve en dos, mientras que se reportan incrementos de los caudales punta en 5 cámaras, destacándose el barril de 2000 l con el cual los caudales se incrementan notablemente.

#### Zona 4

Para la zona 4, la variación en porcentaje de los caudales de inundación para las 5 opciones de barriles, se observa en la Figura 5-14.



**Figura 5-14:** Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 4

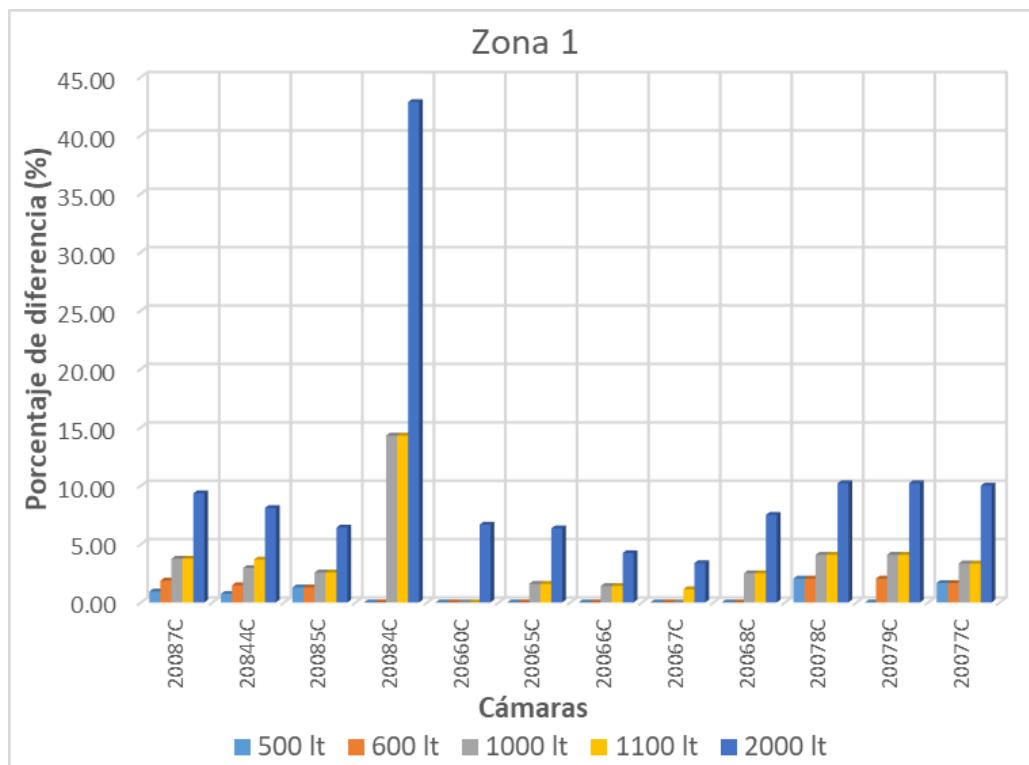
Según se observa la Figura 5-14, se presenta una mayor reducción del caudal de inundación de acuerdo a la variación del porcentaje para opción 5 en la cámara 20092C, con valor de 29.94 %. En menor medida se presentan variaciones de porcentaje en al menos una opción de barril de lluvia, en las cámaras 20101C, 20099C, 20094C, 20090C, 20200C, 20199C, 20539C, 20950C, 20096C, 20542C, 20543C y 20651C. Por otro lado, observando resultados que no presentan un buen funcionamiento de los depósitos, se tienen las cámaras 20098C, 20086C, 20089C, 20541C y 20195C donde los porcentajes de variación fueron negativos para las simulaciones de las 5 opciones de barriles. De manera que, igual que para las otras zonas, el resultado es desfavorable ya que se consigue un decremento significativo en los caudales punta, solamente en 1 cámara, y leve en otra, mientras que se reportan incrementos de los caudales punta en 5 cámaras,

destacándose el barril de 1100 l con el cual los caudales se incrementan notablemente por encima del 20% para dos cámaras.

▪ **Análisis de los volúmenes de inundación para las 5 opciones de barriles aplicados en las zonas críticas**

Para conocer la variación en el porcentaje del volumen para las simulaciones con barriles de lluvia, frente a la simulación sin SUDS, a continuación se presentan las ilustraciones para cada una de las tres zonas críticas, identificadas en la Figura 5-15, Figura 5-16, Figura 5-17 y Figura 5-18.

**Zona 1**



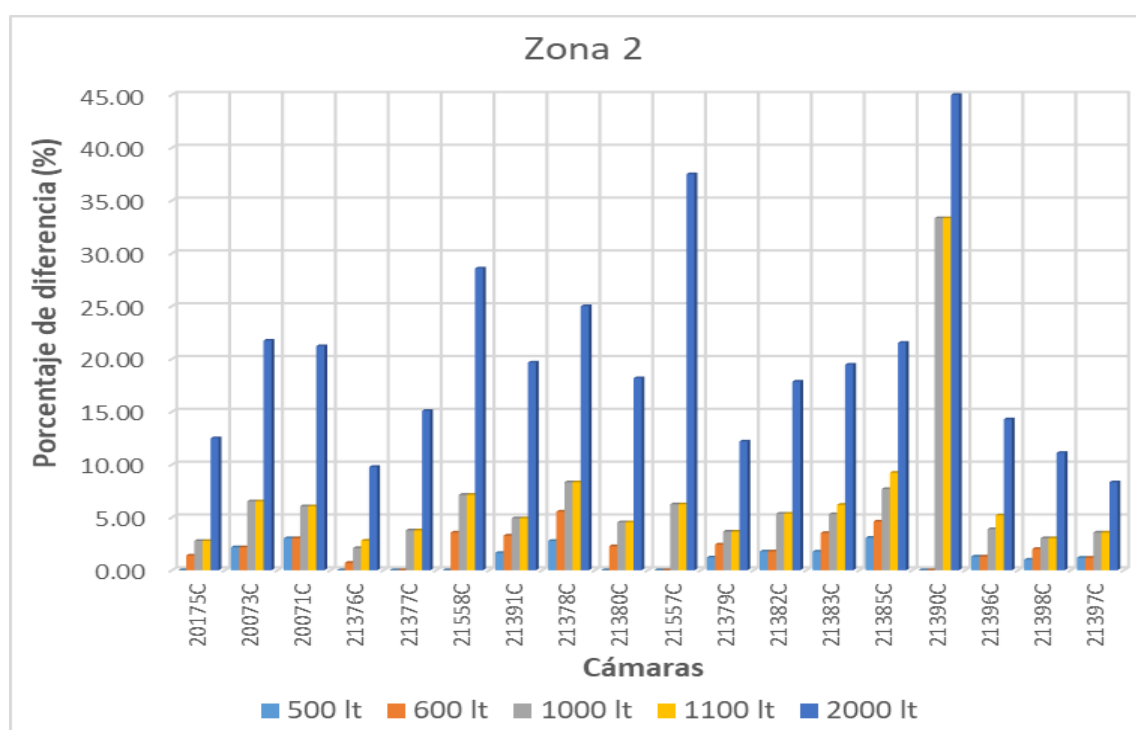
**Figura 5-15:** Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con barriles de lluvia y la simulación sin SUDS para la zona 1

De acuerdo con la Figura 5-15, la opción 5, presenta un comportamiento con mejores resultados, mostrando disminuciones en los volúmenes de inundación entre 3.37 y 42.86%, resultados obtenidos en la cámara 20067C y 220084C respectivamente. Las opciones 1 y 2, mostraron resultados sin variación en el volumen para las cámaras 20844C,



20085C, 20084C, 20660C, 20065C, 20066C, 20067C, 20068C, lo que representa una funcionalidad nula al aplicar los barriles en las anteriores cámaras. Por otro lado, las opciones 3 y 4, mostraron variaciones entre 1.41 y 14.29 %, porcentajes presentados entre las cámaras 20087C, 20844C, 20085C, 20084C, 20660C 20065C, 20066C, 20067C, 20068C, 20078C, 20079C y 20077C, mostrando reducción en los volúmenes para las cámaras mencionadas. En resumen, el efecto sobre los volúmenes de inundación es totalmente diferente a los caudales punta mostrados anteriormente ya que se consiguen decrementos significativos. El barril de 2000 l consigue decrementos del ~17% en promedio, con valores muy superiores a los otros barriles. Sin embargo, todos los barriles consiguen reducir los volúmenes de inundación.

## Zona 2

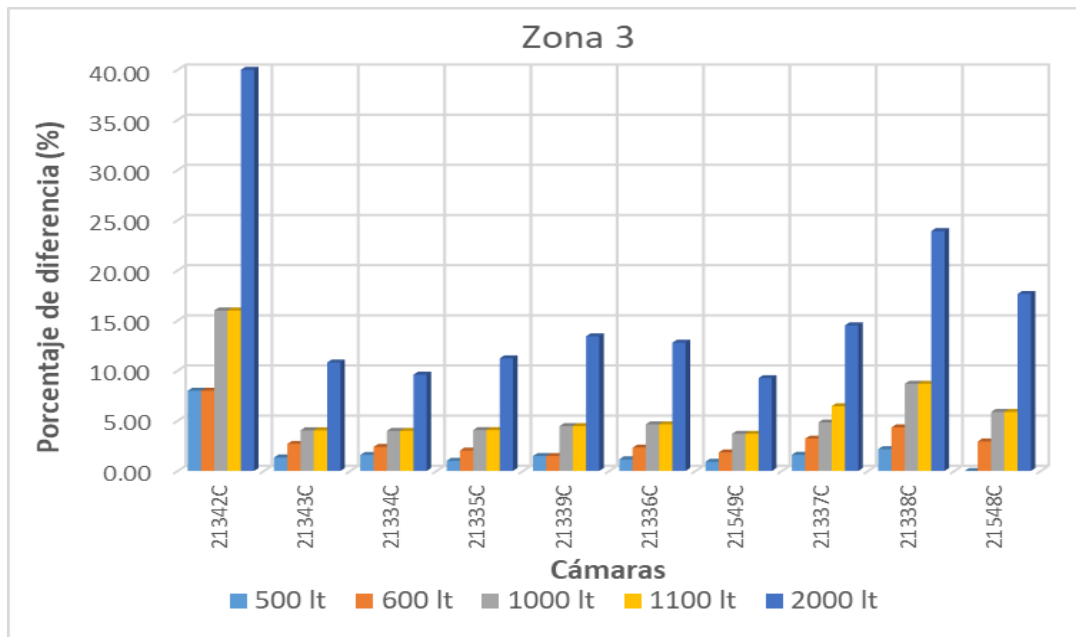


**Figura 5-16:** Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con barriles de lluvia y la simulación sin SUDS para la zona 2

Según la Figura 5-16 la opción 5, presenta un mejor comportamiento en comparación con las otras opciones de barriles, mostrando resultados entre 8.33 y 66.67 % obtenidos en la cámara 21397C y 21390C respectivamente. La opción 1 mostró resultados sin variación en el volumen para las cámaras 20175C, 20073C, 20071C, 21376C, 1377C, 21558C,

21391C, 21378C, 21380C, 21557C, 21379C, 21382C, 21383C, 21385C y 21390C, lo que representa una funcionalidad nula al aplicar los barriles para estas cámaras. Por otro lado, las opciones 3 y 4, presentaron un comportamiento similar en sus porcentajes, mostrando variaciones entre 2.10 y 33.33% para la opción 3 y 2.78 y 33.33% para la opción 4, porcentajes que mostraron reducción de volumen en las cámaras 20175C, 20073C, 20071C, 21376C, 21377C, 21558C, 21391C, 21378C, 21380C, 21557C, 21379C, 21382C, 21383C, 21385C, 21390C, 21396C, 21398C y 21397C. En resumen, en esta zona también se consiguen excelentes resultados logrando siempre decrementos en los volúmenes de inundación, y especialmente se destaca el barril de 2000 l.

### Zona 3

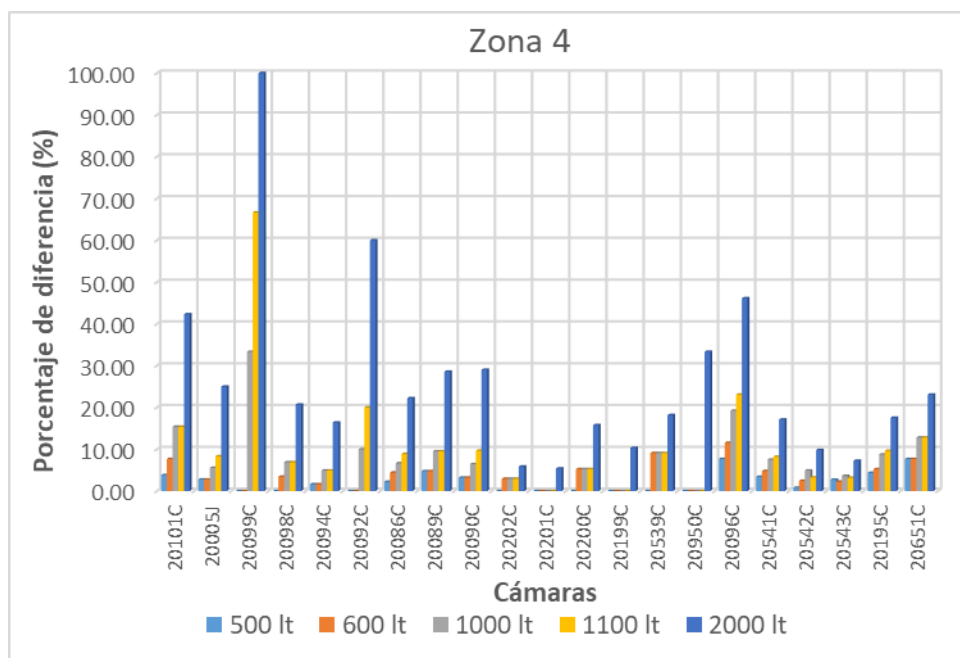


**Figura 5-17:** Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con barriles de lluvia y la simulación sin SUDS para la zona 3

Para el caso de la zona 3 y según la Figura 5-17, la opción 5, continúa mostrando mejores resultados en comparación con las otras 4 opciones de barriles, con resultados entre 9.26 y 40 % obtenidos en la cámara 21549C y 21342C respectivamente. La opción 1 mostró resultados sin variación en el volumen para la cámara 21548C, lo que representa una funcionalidad nula al aplicar los barriles para esta cámara. Por otro lado, las opciones 3 y 4, presentaron un comportamiento similar en sus porcentajes, mostrando variaciones entre

3.70 y 16.00 %, porcentajes que mostraron reducción de volumen en las 10 cámaras determinadas para la zona 3.

#### Zona 4



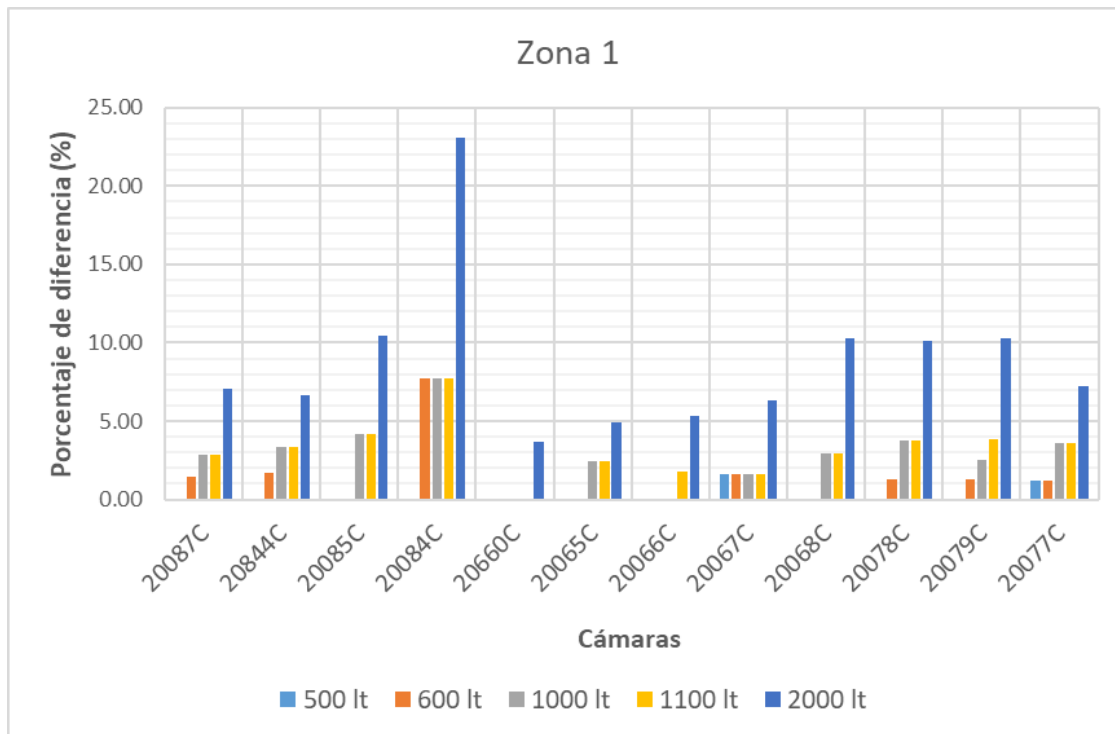
**Figura 5-18:** Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con barriles de lluvia y la simulación sin SUDS para la zona 4

Para el caso de la zona 4 y según la Figura 5-18, la opción 5, continúa mostrando mejores resultados en comparación con las otras 4 opciones de barriles, con resultados entre 5.41 y 100 % obtenidos en la cámara 20201C y 20099C respectivamente. La opción 1 mostró resultados sin variación en el volumen para las cámaras 20099C, 20098C, 20092C, 20201C, 20199C y 20950C, lo que representa una funcionalidad nula al aplicar los barriles para estas cámaras. Por otro lado, las opciones 3 y 4, presentaron un comportamiento similar en sus porcentajes, mostrando también resultados sin variaciones en las cámaras 20201C, 20199C y 20950C.

▪ **Análisis de los tiempos de inundación para las 5 opciones de barriles aplicados en las zonas críticas**

Para realizar el presente análisis se consideró el tiempo que dura la inundación en cada cámara evaluada, dentro de las 4 zonas determinadas. Con el fin evaluar la variación del tiempo de inundación entre las opciones de barriles de lluvia y la simulación sin SUDS, se presentan las ilustraciones para cada una de las tres zonas críticas identificadas.

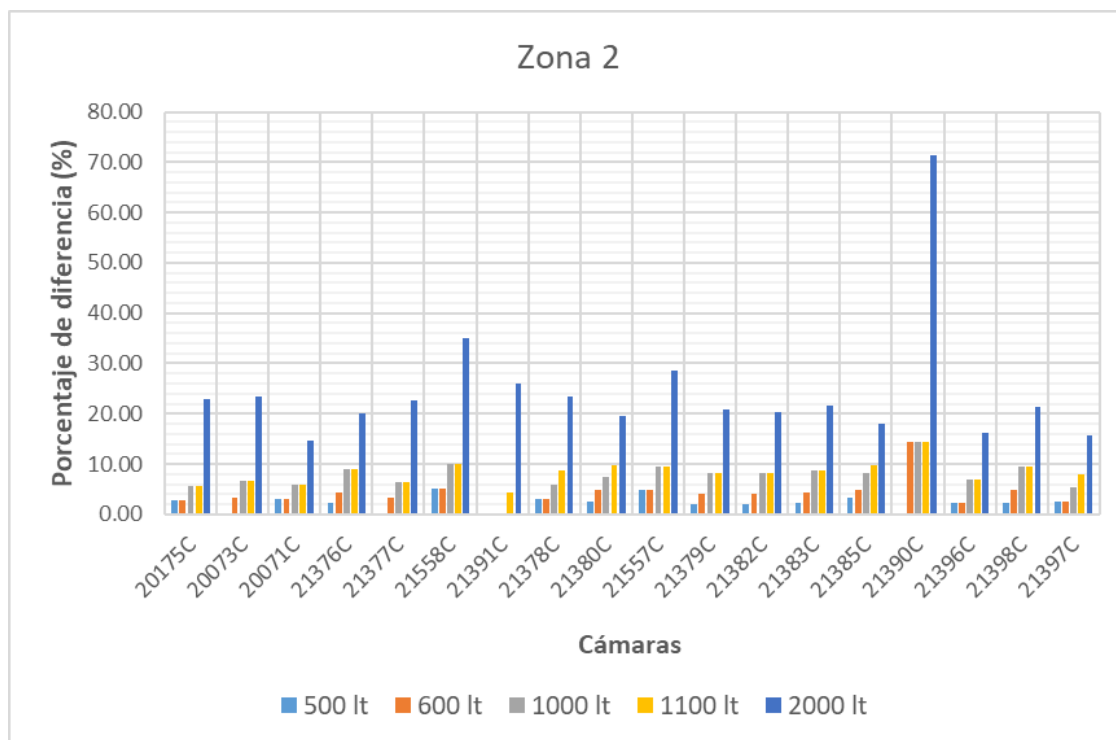
**Zona 1**



**Figura 5-19:** Variación del tiempo de inundación entre las opciones de barriles de lluvia y la simulación sin SUDS para la zona 1

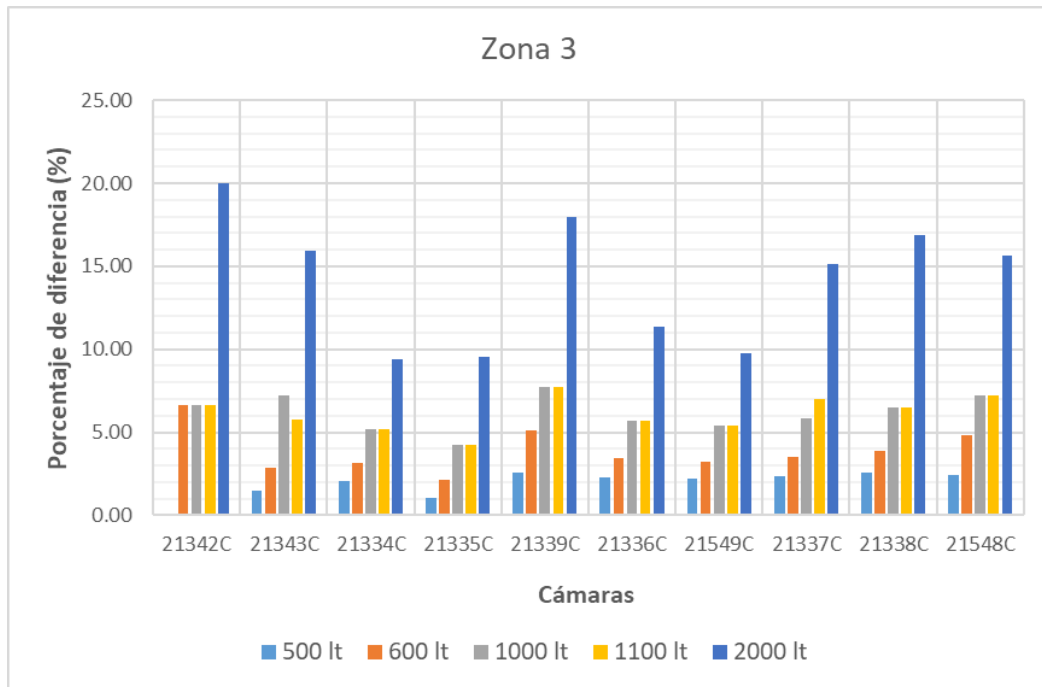
De acuerdo a la Figura 5-19, la variación más baja en los porcentajes de tiempos de inundación la presentó la opción 1, donde solamente se observó variación en 2 de las 12 cámaras consideradas en la zona 1 para realizar el análisis. Por otro lado, la opción que presentó mayor variación en el tiempo de inundación, corresponde a la opción 5, cuyos resultados se pudieron observar en las 12 cámaras consideradas para el análisis. Los porcentajes de la anterior opción, estuvieron entre 3.70 y 23.08 %, correspondiendo a las cámaras 20660C y 20084C. En conclusión, los barriles de 1000, 1100 y 2000 l siempre reducen el tiempo de inundación, destacándose el barril de 2000 l.

## Zona 2



**Figura 5-20:** Variación del tiempo de inundación entre las opciones de barriles de lluvia y la simulación sin SUDS para la zona 2

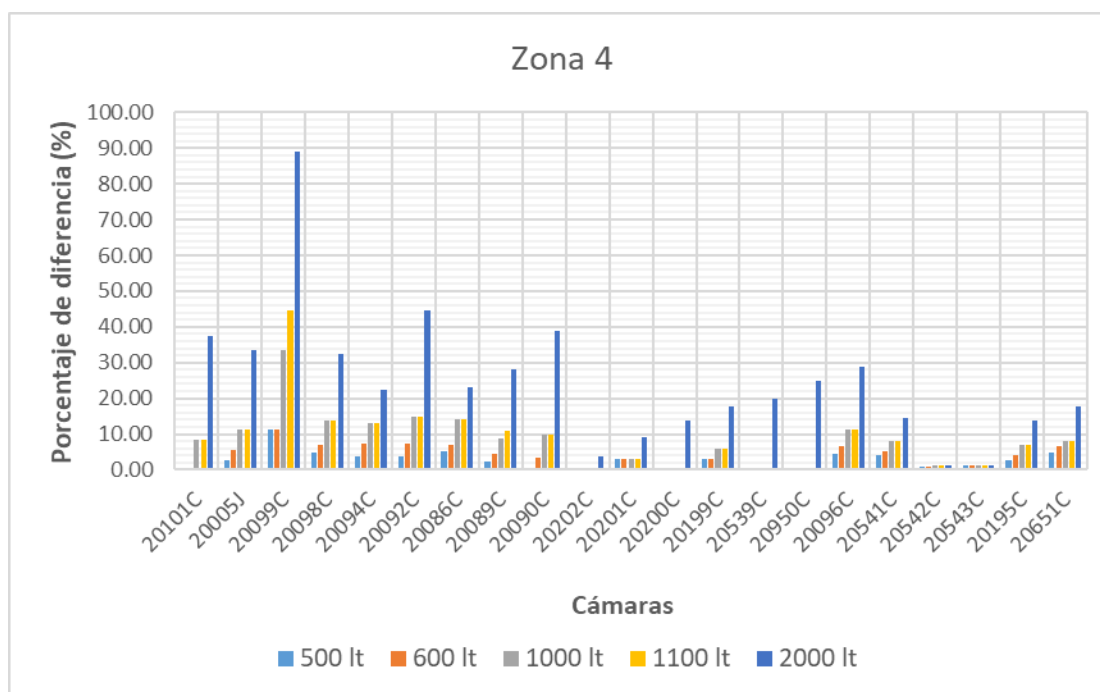
Según la Figura 5-20, la variación más baja en los porcentajes de tiempos de inundación la presentó la opción 1, donde solamente se observó variación en 16 de las 18 cámaras consideradas en la zona 2 para adelantar el análisis. Para la presente zona, la alternativa de barril que presentó mayor variación en el tiempo de inundación, corresponde a la opción 5, cuyos resultados se pudieron observar en las 18 cámaras consideradas para el análisis. Los porcentajes de la anterior opción, estuvieron entre 14.71 y 71.43%, correspondiendo a las cámaras 20071C y 21390C.

**Zona 3**

**Figura 5-21:** Variación del tiempo de inundación entre las opciones de barriles de lluvia y la simulación sin SUDS zona 3

En la Figura 5-21, se puede observar que la variación más baja en los porcentajes de tiempos de inundación la presentó la opción 1, presentando porcentajes entre 1.06 y 2.60 % para 11 cámaras de las 12 consideradas en la zona 3. Por otro lado, se pudo observar que la alternativa de barril que presentó mayor variación en el tiempo de inundación, corresponde a la opción 5, cuyos porcentajes estuvieron entre 9.38 y 20.00%, correspondiendo a las cámaras 21549C y 21342C.

## Zona 4



**Figura 5-22:** Variación del tiempo de inundación entre las opciones de barriles de lluvia y la simulación sin SUDS zona 4

En la Figura 5-22, se observa que no se presentó variación del tiempo de inundación en 6 de las 21 cámaras consideradas en la zona 4. Por otro lado, se pudo observar que la alternativa de barril que presentó mayor variación en el tiempo de inundación, corresponde a la opción 5, cuyos porcentajes estuvieron entre 3.70 y 88.89 %, correspondiendo a las cámaras 20202C y 20099C.

### ▪ Relación de tiempos y volúmenes de inundación para zonas críticas.

En la Tabla 5-13 se puede apreciar el comportamiento resumido de los tiempos y volúmenes de inundación, asociados al número de cámaras que se inundan según el lapso determinado para cada una de las simulaciones realizadas, el tiempo se clasificó en intervalos de 10 minutos iniciando desde el minuto 0 hasta el rango con valores mayores a 50 minutos. Lo anterior se aplicó a las diferentes simulaciones realizadas, partiendo desde el escenario sin SUDS e incluyendo las 5 opciones consideradas para barriles de lluvia de 500, 600, 1000, 1100 y 2000 litros.

**Tabla 5-13: Relación de tiempos y volúmenes de inundación****Zona 1**

	<b>Opción sin SUDS</b>		<b>Opción 1: 500 l</b>		<b>Opción 2: 600 l</b>		<b>Opción 3: 1000 l</b>		<b>Opción 4: 1100 l</b>		<b>Opción 5: 2000 l</b>	
Periodo (Min)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)
0-10	1	0.007	1	0.007	1	0.007	1	0.006	1	0.006	1	0.004
10-20	1	0.030	1	0.030	1	0.030	1	0.030	1	0.030	1	0.028
20-30	2	0.141	2	0.140	2	0.140	2	0.138	2	0.138	2	0.132
30-40	3	0.296	3	0.295	3	0.294	4	0.369	4	0.367	5	0.450
40-50	5	0.345	5	0.342	5	0.340	4	0.255	4	0.255	3	0.142
>50	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>0.819</b>	<b>12</b>	<b>0.814</b>	<b>12</b>	<b>0.811</b>	<b>12</b>	<b>0.798</b>	<b>12</b>	<b>0.796</b>	<b>12</b>	<b>0.756</b>

**Zona 2**

	<b>Opción sin SUDS</b>		<b>Opción 1: 500 l</b>		<b>Opción 2: 600 l</b>		<b>Opción 3: 1000 l</b>		<b>Opción 4: 1100 l</b>		<b>Opción 5: 2000 l</b>	
Periodo (Min)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)
0-10	1	0.003	1	0.003	1	0.003	1	0.002	1	0.002	3	0.031
10-20	5	0.204	7	0.269	7	0.266	8	0.327	8	0.327	9	0.447
20-30	11	0.839	9	0.763	9	0.756	8	0.672	8	0.669	5	0.404
30-40	1	0.065	1	0.063	1	0.062	1	0.060	1	0.059	1	0.051
40-50	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
>50	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>1.111</b>	<b>18</b>	<b>1.098</b>	<b>18</b>	<b>1.087</b>	<b>18</b>	<b>1.061</b>	<b>18</b>	<b>1.057</b>	<b>18</b>	<b>0.933</b>



**Zona 3**

	<b>Opción sin SUDS</b>		<b>Opción 1: 500 l</b>		<b>Opción 2: 600 l</b>		<b>Opción 3: 1000 l</b>		<b>Opción 4: 1100 l</b>		<b>Opción 5: 2000 l</b>	
Periodo (Min)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)
0-10	1	0.025	1	0.023	1	0.023	1	0.021	1	0.021	1	0.015
10-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.058
20-30	1	0.067	1	0.066	1	0.066	1	0.064	1	0.064	0	0
30-40	0	0	0	0	0	0	1	0.071	1	0.071	2	0.101
40-50	3	0.154	3	0.152	4	0.209	4	0.215	4	0.214	4	0.254
>50	5	0.479	5	0.473	4	0.408	3	0.318	3	0.318	2	0.2
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>0.725</b>	<b>10</b>	<b>0.714</b>	<b>10</b>	<b>0.706</b>	<b>10</b>	<b>0.689</b>	<b>10</b>	<b>0.688</b>	<b>10</b>	<b>0.628</b>

**Zona 4**

	<b>Opción sin SUDS</b>		<b>Opción 1: 500 l</b>		<b>Opción 2: 600 l</b>		<b>Opción 3: 1000 l</b>		<b>Opción 4: 1100 l</b>		<b>Opción 5: 2000 l</b>	
Periodo (Min)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)
0-10	2	0.009	2	0.009	2	0.009	2	0.008	2	0.007	5	0.032
10-20	7	0.168	8	0.195	8	0.191	9	0.221	9	0.218	9	0.21
20-30	5	0.141	4	0.108	5	0.106	5	0.167	5	0.165	2	0.086
30-40	3	0.145	3	0.14	2	0.079	1	0.034	1	0.034	3	0.245
40-50	2	0.26	2	0.25	2	0.247	2	0.239	2	0.237	0	0
>50	2	0.342	2	0.342	2	0.335	2	0.328	2	0.331	2	0.314
<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>1.065</b>	<b>21</b>	<b>1.044</b>	<b>21</b>	<b>0.967</b>	<b>21</b>	<b>0.997</b>	<b>21</b>	<b>0.992</b>	<b>21</b>	<b>0.887</b>

---

### **Análisis de la relación de tiempos y volúmenes de inundación**

Según lo observado en la Tabla 5-13, se aprecia una reducción del volumen de inundación en las 5 opciones de barriles para cada una de las 4 zonas, mostrando un mejor comportamiento la opción 5 al presentar el menor volumen de las 5 opciones consideradas.

Para la zona 1, la opción 5 mostró un volumen de 756000 litros comparado con la opción sin SUDS donde se observó un valor de 819000 litros. Para ambas opciones, el menor volumen según los periodos considerados, se presentó en el tiempo de inundación comprendido entre 0 y 10 minutos, con valores de 4000 litros para la opción 5 y 7000 litros para la opción sin SUDS, por otro lado, la cantidad de cámaras inundadas para este mismo periodo fue de 1 unidad para ambas opciones.

Con relación a la zona 2, se puede observar que en los periodos de tiempo comprendidos entre 40 y 50 minutos y mayores a 50 minutos, no se presentaron volúmenes de inundación para ninguna opción planteada. Por otro lado, la opción 5 presentó un volumen de inundación de 933000 litros y la opción sin SUDS un volumen de 1111000 litros. Para ambas opciones, el menor volumen según los periodos considerados, se presentó en el tiempo de inundación comprendido entre los 30 y 40 minutos, con valores de 51000 litros para la opción 5 y 65000 litros para la opción sin SUDS, por otro lado, el número de cámaras inundadas para este mismo periodo fue de 1 unidad para cada opción.

En la zona 3, la opción 5 presentó un volumen de inundación de 628000 litros y la opción sin SUDS un volumen de 725000 litros. Para la opción 5, el menor volumen según los periodos considerados, se presentó en el tiempo de inundación comprendido entre 0 y 10 minutos, con un valor de 15000 litros y 1 cámara inundada, por su parte, la opción sin SUDS presentó menor volumen con valor de 25000 litros, para el mismo periodo, igualmente con 1 sola cámara inundada.

Por su parte, en la zona 4, la opción 5 presentó un volumen de inundación de 887000 litros y la opción sin SUDS un volumen de 1065000 litros. Para la opción 5, el mayor volumen según los periodos considerados, se presentó en el tiempo de inundación comprendido en los periodos mayores a 50 minutos, con un volumen de 314000 litros y 2 cámaras inundadas, por otro lado, la opción sin SUDS presentó mayor volumen con valor de 342000

litros, igualmente para tiempos de inundación mayores a 50 minutos, con 2 cámaras inundadas.

### **5.3.6 Evaluación hidráulica de los SUDS para las opciones 6 y 7**

Una vez configurado el modelo con la información para las opciones 6 y 7 (1000 litros en 2 niveles y 2000 litros en 1 nivel, respectivamente) y teniendo en cuenta el número máximo de barriles determinado para cada unidad de techo según la clasificación por área realizada, se ingresa la información con el nuevo número de barriles de lluvia, corriendo el modelo para conocer el comportamiento considerando las 2 nuevas condiciones para tanques de 1000 y 2000 litros, en cada una de las 4 zonas identificadas como críticas cuya evaluación se realizó comparando los resultados a través de su relación con el modelo sin SUDS.

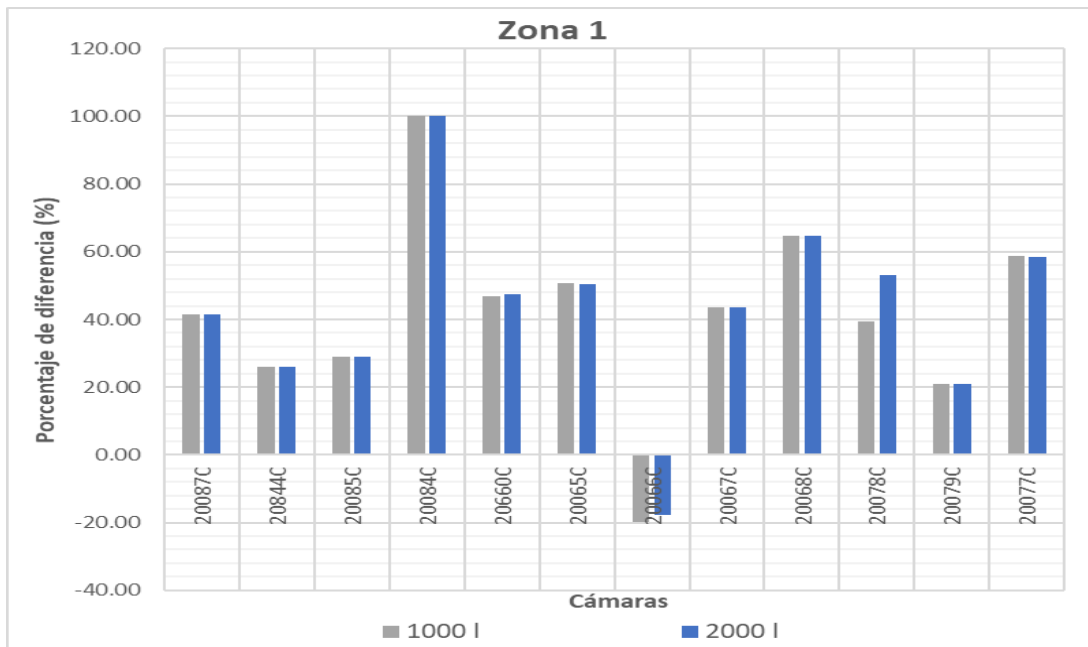
Adelantadas las simulaciones sin SUDS y con SUDS, se tomó nuevamente el minuto 30 como momento crítico para analizar el comportamiento hidráulico para la cuenca de estudio.

- **Variación de porcentaje de caudales de inundación para opciones 6 y 7**

Los caudales máximos de inundación que se presentan en cada cámara para cada opción con SUDS fueron comparados con los obtenidos en la simulación sin SUDS y los resultados se muestran en la Figura 5-23, Figura 5-24, Figura 5-25 y Figura 5-26, representando respectivamente a las zonas 1, 2, 3 y 4 (valores positivos indican disminución de los caudales punta, mientras que valores negativos incrementos). Observando el comportamiento en cada una de las figuras, se puede concluir que en cada una de las zonas donde fueron aplicadas las 2 opciones con barriles de lluvia los resultados fueron satisfactorios para los caudales punta en la mayoría de las cámaras analizadas para las 4 zonas evaluadas, donde la atenuación llegó en algunos casos al 100 %. Por otro lado, se logra apreciar un mejor comportamiento en los resultados obtenidos para las opciones 6 y 7, en comparación con las 5 primeras opciones evaluadas.

### Zona 1

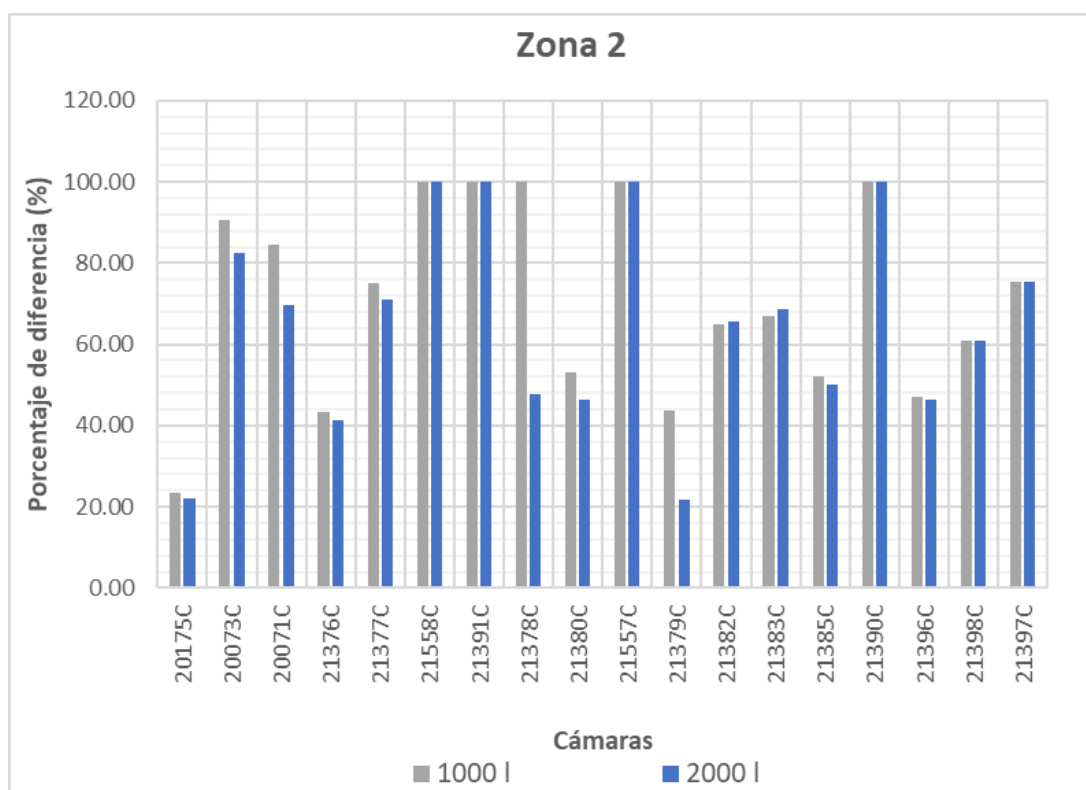
En la Figura 5-23 se observa la variación en porcentaje de los caudales de inundación para la zona 1, considerando las simulaciones de las 2 opciones de barriles. Se aprecia una mayor variación del porcentaje en los caudales de inundación para la cámara 20084C, con un porcentaje de atenuación de 100 % para ambas opciones. En 7 de 12 cámaras evaluadas, se presentaron porcentajes de reducción por encima de 40% en al menos una de las dos opciones de barril de lluvia evaluadas, en las cámaras 20087C, 20660C, 20065C, 20067C, 20668C, 20078C y 20077C. Por otro lado, se observa que en la cámara 20066C la variación fue negativa para las 2 opciones evaluadas. En resumen, en términos generales se consigue buena mitigación de los caudales punta en la mayoría de las cámaras. Es notable cómo el comportamiento tanto para la opción de 1000 litros en 2 niveles como la opción de 2000 litros en un solo nivel, resulta ser muy similar, lo que demuestra ambas opciones presentan resultados satisfactorios.



**Figura 5-23:** Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 1

## Zona 2

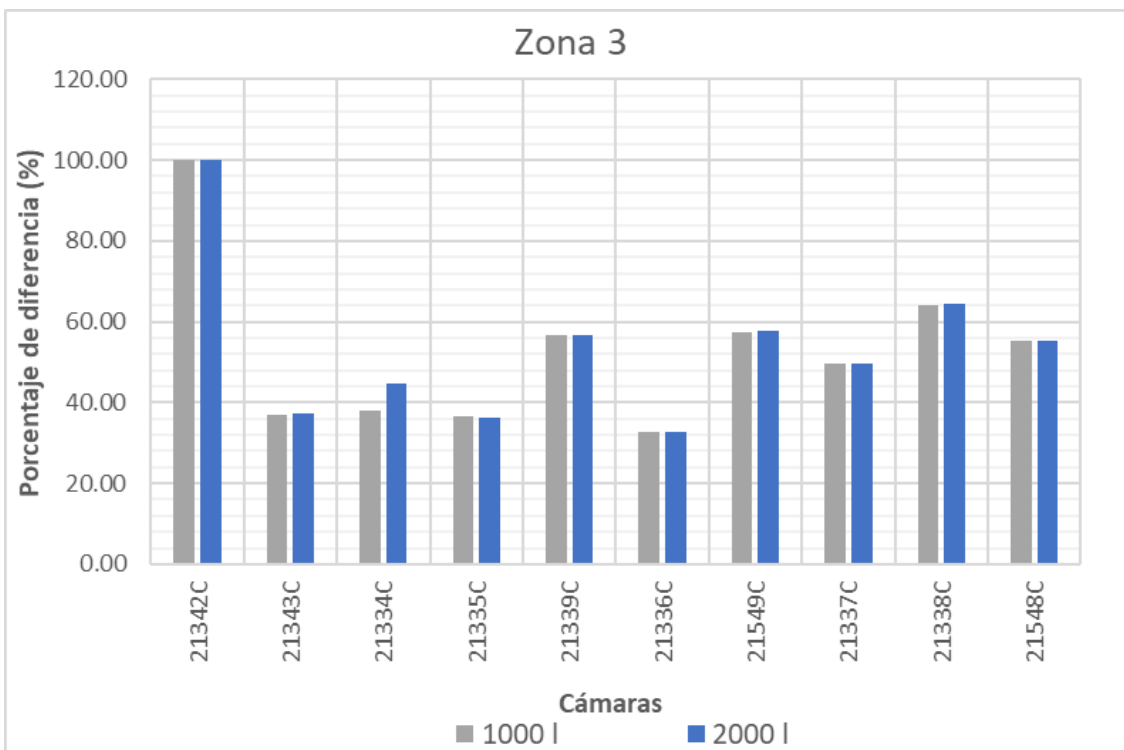
La variación en porcentaje de los caudales de inundación para la zona 2 se observa en la Figura 5-24. Se aprecian reducciones de los caudales superiores al 60% en 12 de las 18 cámaras evaluadas para la zona 2, siendo estas las cámaras 20073C, 20071C, 21377C, 21558C, 21391C, 21378C, 21557C, 21382C, 21383C, 21390C, 21398C y 21397C. Por otro lado, se presenta reducción de caudales de inundación del 100% al menos en una de las dos opciones de barril de lluvia en las cámaras 21558C, 21391C, 21378C, 21557C, 21390C. Por otra parte, se observan resultados que muestran porcentajes de atenuación cercanos al 20% sólo en 2 de las 18 cámaras evaluadas, siendo estas las cámaras 20175C y 21379C, lo que refleja en términos generales, un buen comportamiento de las alternativas evaluadas en la zona 2. En general, se puede observar que el comportamiento de la zona 2 presenta mejores resultados, que el observado en la zona 1, al contar con mayores porcentajes de variación en la totalidad de las cámaras evaluadas.



**Figura 5-24:** Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 2

### Zona 3

Para la zona 3, la variación en porcentaje de los caudales de inundación para las 2 opciones de barriles, se observa en la Figura 5-25. Se aprecia una mayor variación del porcentaje en los caudales de inundación para la cámara 21342C, con un porcentaje de reducción de 100 % para la opción 6 y 7. En 7 de 10 cámaras evaluadas, se presentaron porcentajes de atenuación por encima de 40% en al menos una de las dos opciones de barril de lluvia evaluadas, en las cámaras 21342C, 21334C, 21339C, 21549C, 21337C, 21338C y 21548C. Por otra parte, se observan resultados que muestran porcentajes de atenuación superiores al 25% en el total de las cámaras de la zona evaluada, lo que refleja en términos generales, un buen comportamiento para las opciones 6 y 7 en la zona 3.

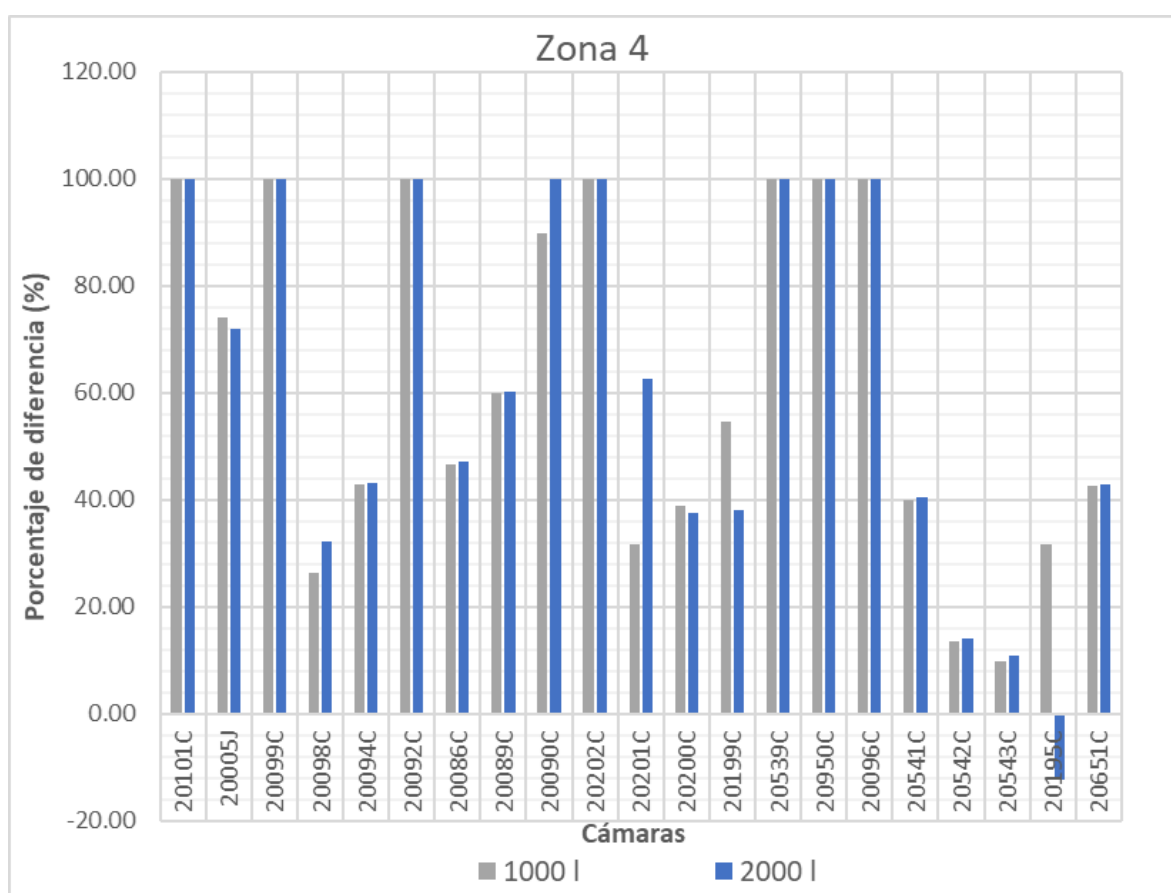


**Figura 5-25:** Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 3

### Zona 4

Para la zona 4, la variación en porcentaje de los caudales de inundación para las 2 opciones de barriles aplicadas, se observa en la Figura 5-26. Se presenta reducción de caudales de inundación del 100% al menos en una de las dos opciones de barril de lluvia en las cámaras 20101C, 20099C, 20092C, 20090C, 20202C, 20539C, 20950C, 20096C,

mostrando muy buen resultado en comparación con las otras 3 zonas. En 19 de las 21 cámaras evaluadas en la zona 4, se presentaron atenuaciones con porcentajes superiores al 25%. Por otro lado, observando resultados que no presentan un buen funcionamiento de los depósitos, se tiene solamente la cámara 20195C, donde la opción de 2000 litros en un solo nivel, presentó aumento de caudal punta. En general, igual que para las otras zonas, el resultado al realizar las simulaciones para las opciones 6 y 7 es favorable ya que se consigue un decremento significativo en los caudales de inundación, para 20 de las 21 cámaras evaluadas en la zona 4, mostrando un comportamiento satisfactorio igual que para las otras zonas evaluadas.



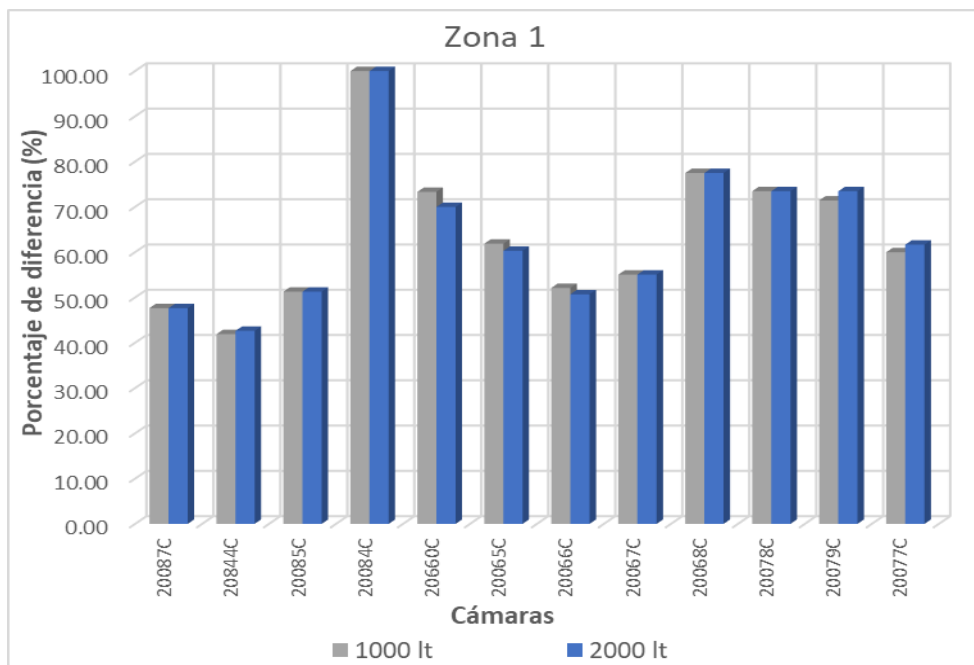
**Figura 5-26:** Variación en porcentaje de caudales de inundación de los barriles de lluvia con respecto a la simulación sin SUDS en zona 4

▪ **Análisis de los volúmenes de inundación para las opciones 6 y 7 aplicadas en las zonas críticas**

Para conocer la variación en el porcentaje del volumen para las simulaciones con barriles de lluvia, frente a la simulación sin SUDS, a continuación se presentan las ilustraciones para cada una de las cuatro zonas críticas, identificadas en la Figura 5-27, Figura 5-28, Figura 5-29 y Figura 5-30.

**Zona 1**

De acuerdo con la Figura 5-27, ambas opciones, presentan un comportamiento muy similar, mostrando disminuciones en los volúmenes de inundación entre 41.91 y 100 %, en la cámara 20844C y 20084C respectivamente. Tanto la opción 6 como la 7, mostraron disminuciones en el volumen por encima del 50% para las cámaras 20085C, 20084C, 20660C, 20065C, 20066C, 20067C, 20068C, 20078C, 20079C y 20077C, lo que representa muy buena funcionalidad al aplicar los barriles en las anteriores cámaras. En resumen, el efecto sobre los volúmenes de inundación tiene una relación directa con los caudales punta mostrados anteriormente ya que se logra observar reducciones considerables para cada una de las cámaras evaluadas. Tanto la opción 6 como la opción 7 muestran resultados satisfactorios de una forma similar, consiguiendo decrementos por encima del 60% en promedio.

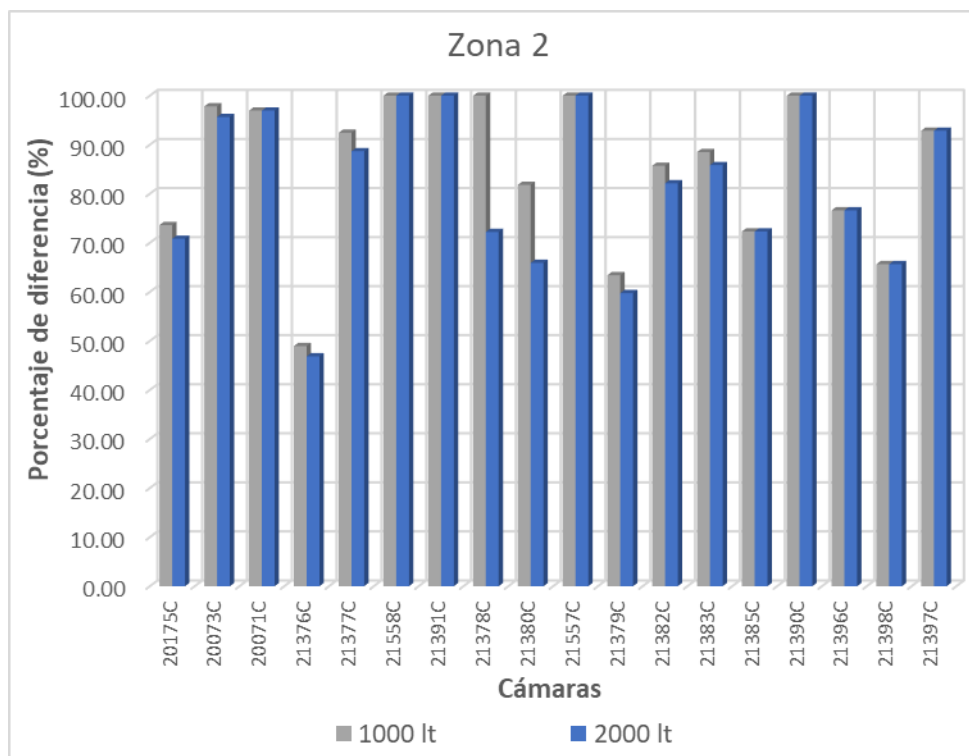


**Figura 5-27:** Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con opción 6 y 7 y la simulación sin SUDS para la zona 1



## Zona 2

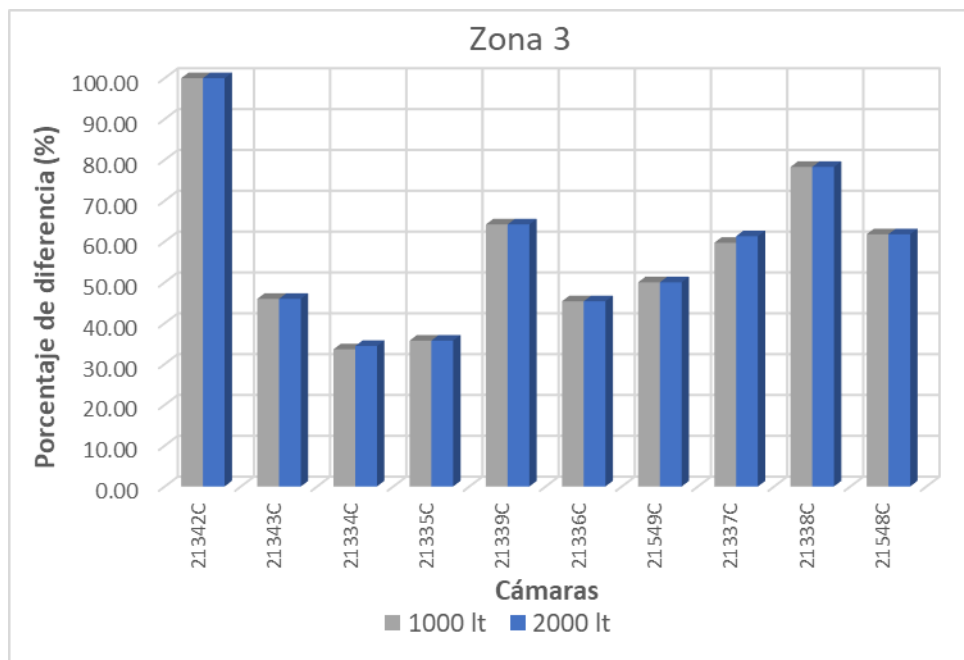
Según la Figura 5-28, ambas opciones, continúan presentando un comportamiento muy similar, mostrando disminuciones en los volúmenes de inundación entre 48.95 para la cámara 21376C y del 100 % en las cámaras 21558C, 21391C, 21378C, 21380C, 21557C, 21390C. Tanto la opción 6 como la 7, mostraron disminuciones en el volumen por encima del 59.76 % para las cámaras 20175C, 20073C, 20071C, 21377C, 21380C, 21379C, 21382C, 21383C, 21385C, 21396C, 21398C y 21397C, lo que representa muy buena funcionalidad al aplicar los barriles en las anteriores cámaras. Igual que en la zona 1, el efecto sobre los volúmenes de inundación tiene una relación directa con los caudales punta mostrados anteriormente ya que se logra observar reducciones considerables para cada una de las cámaras evaluadas. Tanto la opción 6 como la opción 7 muestran resultados satisfactorios de forma similar, consiguiendo decrementos por encima del 83.58 % en promedio.



**Figura 5-28:** Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con opción 6 y 7 y la simulación sin SUDS para la zona 2

### Zona 3

Para el caso de la zona 3 y según la Figura 5-29, ambas opciones, continúan presentando un comportamiento similar, mostrando disminuciones en los volúmenes de inundación entre 33.6 y 100 % en las cámaras 21334C y 21342C respectivamente. Tanto la opción 6 como la 7, mostraron disminuciones en el volumen por encima del 35% para las cámaras 21343C, 21335C, 21339C, 21336C, 21549C, 21337C, 21338C, 21548C, lo que representa una buena funcionalidad al aplicar los barriles en las anteriores cámaras. Como se aprecia en el análisis y en menor medida que las primeras 2 zonas, se logran atenuar los volúmenes mediante la aplicación de las opciones 6 y 7. Tanto la opción 6 como la opción 7 muestran resultados satisfactorios de una forma similar, consiguiendo disminuciones por encima del 57.57 % en promedio.

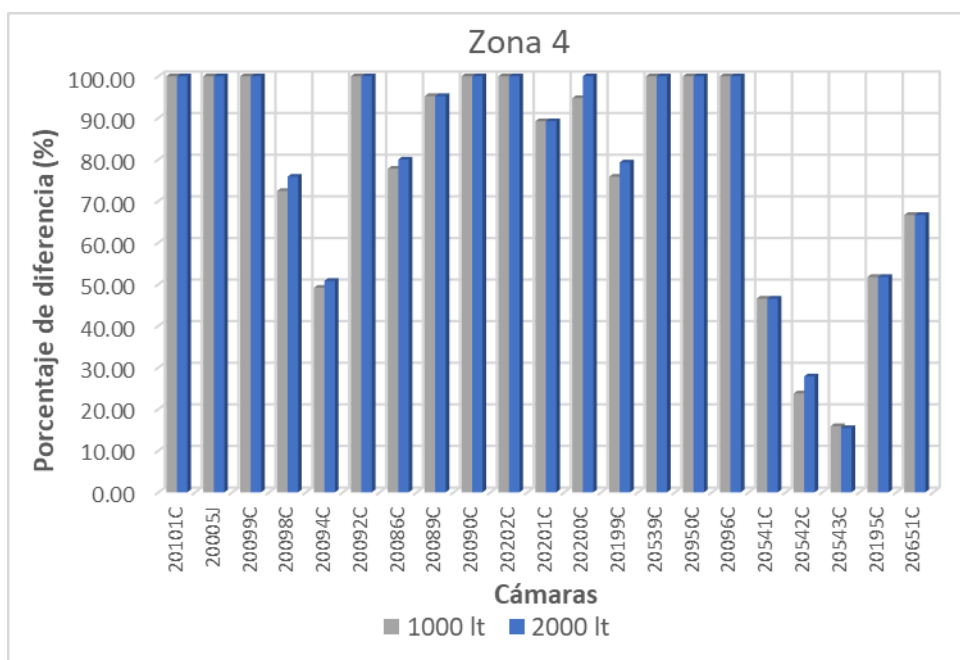


**Figura 5-29:** Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con opción 6 y 7 y la simulación sin SUDS para la zona 3

### Zona 4

Según la Figura 5-30, para el caso de la zona 4, las cámaras 20101C, 20005J, 20099C, 20092C, 20090C, 20202C, 20539C, 20950C, 20096C presentaron disminución del volumen de inundación igual al 100%. Por otro lado, las cámaras 20098C, 20094C, 20086C, 20089C, 20201C, 20200C, 20199C, 20195C, 20651C presentaron reducción del volumen por encima del 50.82%. Lo anterior, representa muy buena funcionalidad al aplicar

los barriles en las anteriores cámaras. Como se observa, tanto la opción 6 como la opción 7 muestran resultados satisfactorios, consiguiendo decrementos por encima del 79.47 % en promedio.



**Figura 5-30:** Variación en porcentaje del volumen de inundación entre las simulaciones con opción 6 y 7 y la simulación sin SUDS para la zona 4

- **Relación de tiempos y volúmenes de inundación con opciones 6 y 7 para zonas críticas**

En la Tabla 5-14 se puede apreciar el resumen del comportamiento de los tiempos y volúmenes de inundación, asociados al número de cámaras que se inundan según el lapso determinado para cada una de las simulaciones realizadas. El tiempo está en intervalos de 10 minutos iniciando desde el minuto 0 hasta los 50 minutos. Lo anterior se aplicó a las diferentes simulaciones realizadas, partiendo desde el escenario sin SUDS e incluyendo las 2 opciones consideradas para barriles de lluvia de 1000 litros en 2 niveles y 2000 litros en un solo nivel.

**Tabla 5-14:** Relación de tiempos y volúmenes de inundación para las opciones 6 y 7**Zona 1**

Periodo (Min)	<b>Opción sin SUDS</b>		<b>Opción 6: 1000 l</b>		<b>Opción 7: 2000 l</b>	
	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)
0-10	1	0.007	1	0.000	1	0.000
10-20	1	0.030	3	0.008	3	0.009
20-30	2	0.141	6	0.062	6	0.063
30-40	3	0.296	1	0.153	1	0.153
40-50	5	0.345	0	0.125	0	0.123
>50	0	0.000	0	0.000	0	0.000
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>0.819</b>	<b>11</b>	<b>0.348</b>	<b>11</b>	<b>0.348</b>

**Zona 2**

Periodo (Min)	<b>Opción sin SUDS</b>		<b>Opción 6: 1000 l</b>		<b>Opción 7: 2000 l</b>	
	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)
0-10	1	0.003	9	0.000	8	0.000
10-20	5	0.204	4	0.005	6	0.008
20-30	11	0.839	0	0.210	0	0.240
30-40	1	0.065	0	0.018	0	0.018
40-50	0	0.000	0	0.000	0	0.000
>50	0	0.000	0	0.000	0	0.000
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>1.111</b>	<b>13</b>	<b>0.233</b>	<b>14</b>	<b>0.266</b>

**Zona 3**

	<b>Opción sin SUDS</b>		<b>Opción 6: 1000 l</b>		<b>Opción 7: 2000 l</b>	
Periodo (Min)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)
0-10	1	0.025	0	0	0	0
10-20	0	0	1	0.024	1	0.024
20-30	1	0.067	3	0.063	3	0.063
30-40	0	0	3	0.164	4	0.246
40-50	3	0.154	1	0.083	0	0
>50	5	0.479	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>0.725</b>	<b>8</b>	<b>0.334</b>	<b>8</b>	<b>0.333</b>

**Zona 4**

	<b>Opción sin SUDS</b>		<b>Opción 6: 1000 l</b>		<b>Opción 7: 2000 l</b>	
Periodo (Min)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)
0-10	2	0.009	7	0.021	6	0.018
10-20	7	0.168	3	0.054	3	0.052
20-30	5	0.141	2	0.133	2	0.133
30-40	3	0.145	0	0	0	0
40-50	2	0.26	0	0	0	0
>50	2	0.342	2	0.278	2	0.274
<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>1.065</b>	<b>14</b>	<b>0.486</b>	<b>13</b>	<b>0.477</b>

---

- **Análisis de la relación de tiempos y volúmenes de inundación para las opciones 6 y 7**

De acuerdo con lo observado en la Tabla 5-14, se aprecia una considerable reducción del volumen de inundación en las 2 opciones de barriles para cada una de las 4 zonas, mostrando comportamientos similares para ambos escenarios planteados.

Para la zona 1, tanto la opción 6 como la 7, mostraron volúmenes de 348000 litros. Para ambas opciones, el mayor volumen según los periodos considerados, se presentó en el tiempo de inundación comprendido entre los 30 y 40 minutos, con valores de 153000 litros para las dos opciones, el número de cámaras inundadas para este mismo periodo fue de 1 unidad en ambos casos.

Con relación a la zona 2, la opción 7 presentó un volumen de inundación de 266000 litros, por su parte la opción 6 mostró un volumen de 233000 litros, comparadas con la opción sin SUDS donde se obtuvo un volumen de 1111000 litros, se logra apreciar una alta disminución. Tanto la opción 6 como la 7, presentaron disminuciones en el número de cámaras inundadas hasta de cero, para 4 de los 6 periodos de tiempo analizados.

En la zona 3, la opción 6 presentó un volumen de inundación de 334.000 litros, por su parte la opción 7 mostró un volumen de 333000 litros, comparadas con la opción sin SUDS donde se obtuvo un volumen de 725000 litros, se logra apreciar una alta disminución. Tanto la opción 6 como la 7, presentaron disminuciones en el número de cámaras inundadas, llegando a cero unidades en 2 y 3 de los 6 periodos de tiempo analizados respectivamente. Por su parte, en la zona 4, la opción 7 presentó un volumen de inundación de 477000 litros y la opción sin SUDS un volumen de 1065000 litros. Para la opción 7, el mayor volumen según los periodos considerados, se presentó en el tiempo de inundación comprendido en los periodos mayores a 50 minutos, con un volumen de 274000 litros y 2 cámaras inundadas, por otro lado, la opción sin SUDS presentó mayor volumen con valor de 342000 litros, igualmente para tiempos de inundación mayores a 50 minutos, con 2 cámaras inundadas.

Como en las 3 zonas anteriores, para la zona 4, se logra apreciar una alta disminución de los volúmenes presentados. Tanto la opción 6 como la 7, presentaron disminuciones en el número de cámaras inundadas hasta de cero, para 2 de los 6 periodos de tiempo analizados.

### 5.3.7 Evaluación hidráulica de los SUDS para la opción 8

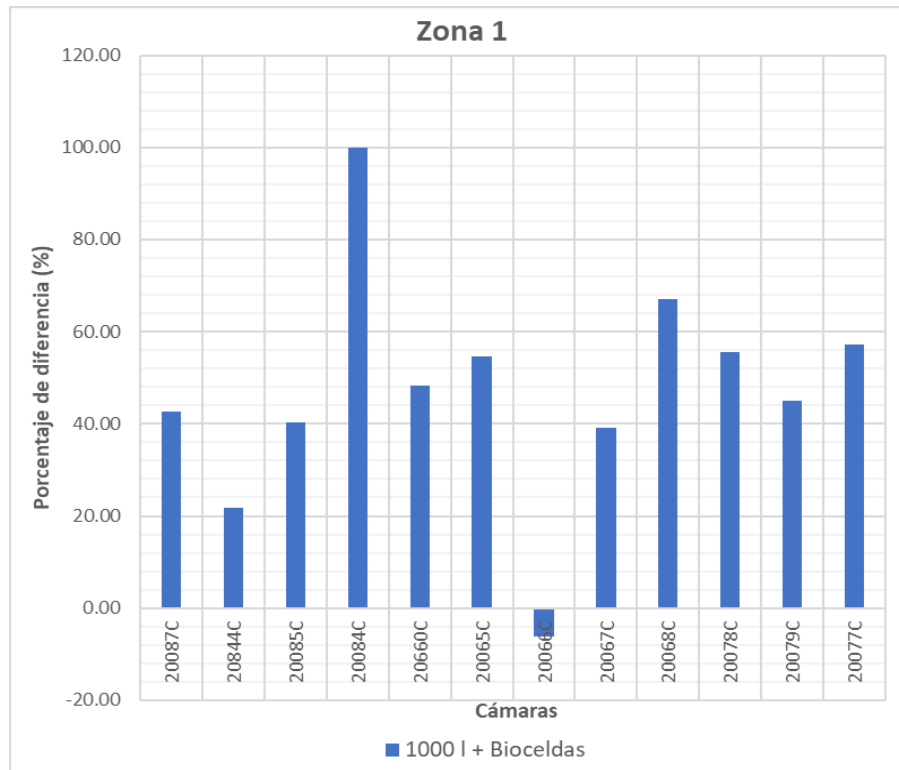
Teniendo configurado el modelo con la información para la opción 8 (barriles de 1000 litros en 2 niveles y celdas de bioretención para flujo en vías) se corre el modelo para conocer el comportamiento considerando la opción 8, para cada una de las 4 zonas identificadas como críticas cuya evaluación se realizó comparando los resultados a través de su relación con el modelo sin SUDS.

- **Variación de porcentaje de caudales máximos de inundación para opción 8**

Los caudales máximos de inundación que se presentan en cada cámara para la opción con SUDS fueron comparados con los obtenidos en la simulación sin SUDS mostrando los resultados en la Figura 5-31, Figura 5-32, Figura 5-33 y Figura 5-34, representando respectivamente a las zonas 1, 2, 3 y 4 (valores positivos indican disminución de los caudales punta, mientras que valores negativos incrementos). Observando el comportamiento en cada una de las figuras, se puede concluir que en cada una de las zonas donde fue aplicada la opción de barriles de 1000 litros en 2 niveles complementada con la alternativa de bioceldas, los resultados fueron satisfactorios, mejorando la atenuación en varias de las cámaras analizadas para las 4 zonas evaluadas.

#### **Zona 1**

En la Figura 5-31 se observa la variación en porcentaje de los caudales de inundación para la zona 1, considerando la simulación del modelo con la opción 8. Se continúa apreciando una variación del porcentaje en los caudales de inundación para la cámara 20084C, con un porcentaje de atenuación de 100 %. En 9 de 12 cámaras evaluadas, se presentaron porcentajes de reducción por encima de 40%, en las cámaras 20087C, 20085C, 20084C, 20660C, 20065C, 20668C, 20078C, 20079C y 20077C. Por otro lado, se observa que la cámara 20066C, aunque no presenta un buen funcionamiento con la opción 8, se logra apreciar una disminución con respecto a la opción 6 y 7, donde este porcentaje pasó de -18.73% (promedio de opciones 6 y 7) a -6.22%. En términos generales la aplicación de la opción 8 continúa presentando buen comportamiento, mitigando los caudales punta en la mayoría de las cámaras para la Zona 1.

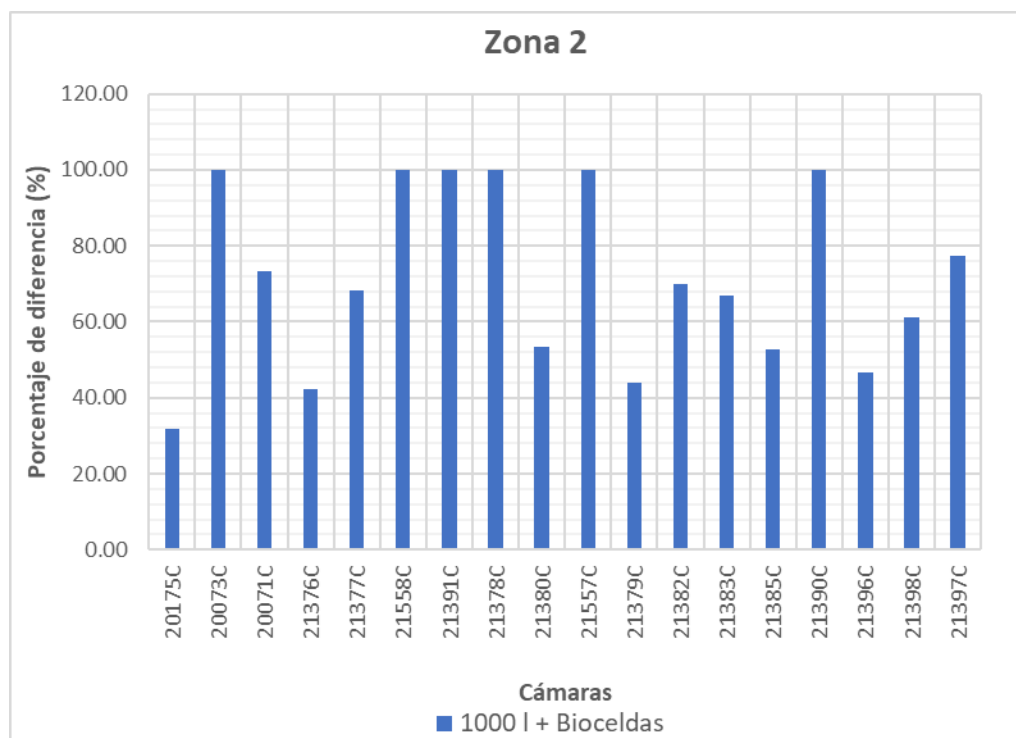


**Figura 5-31:** Variación en porcentaje de caudales de inundación de la opción 8 con respecto a la simulación sin SUDS en zona 1

## Zona 2

La variación en porcentaje de los caudales de inundación para la zona 2, se observa en la Figura 5-32, considerando la simulación de la opción 8 para la presente evaluación. Se continúan apreciando reducciones de caudales superiores al 60% en las cámaras 20073C, 20071C, 21377C, 21558C, 21391C, 21378C, 21557C, 21382C, 21383C, 21390C, 21398C y 21397C. Por otro lado, se presenta reducción de caudales de inundación del 100% en las cámaras 20073C, 21558C, 21391C, 21378C, 21557C, 21390C. Por otra parte, se observan resultados que muestran porcentajes de atenuación entre 40 y 60% en las cámaras 21376C, 21380, 21379C, 21385C y 21396C. Concluyendo el análisis para la zona 2, solamente la cámara 20175 presentó diferencia de porcentaje en el caudal de inundación por debajo de 40%, con un porcentaje de 31.77% lo que refleja en términos generales, un buen comportamiento de la alternativa evaluada en la zona 2.

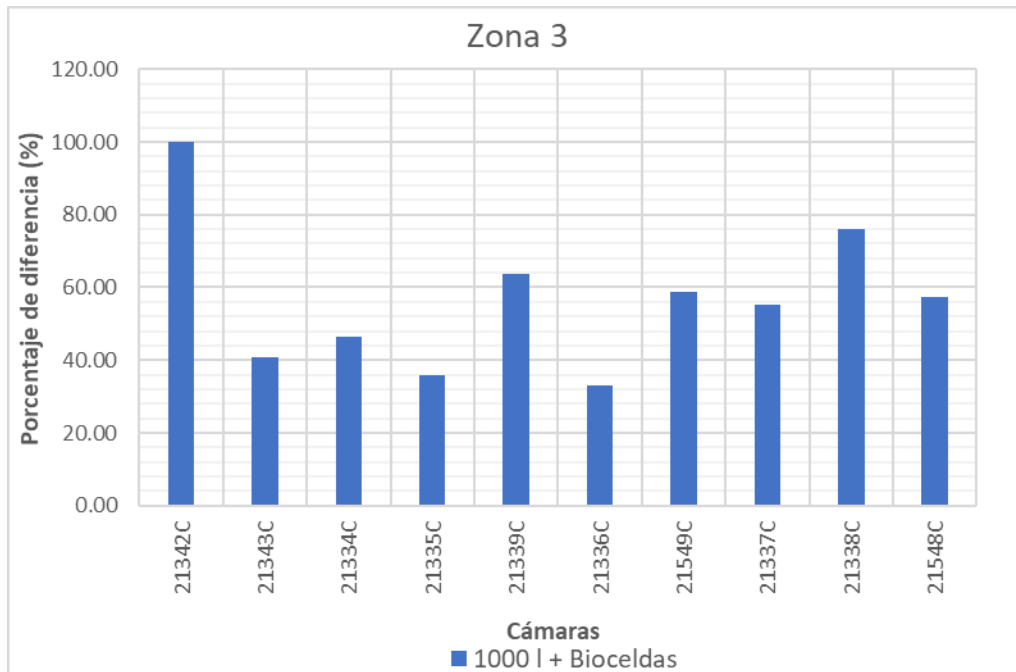




**Figura 5-32:** Variación en porcentaje de caudales de inundación de la opción 8 con respecto a la simulación sin SUDS en zona 2

### Zona 3

Para la zona 3, la variación en porcentaje de los caudales de inundación aplicando la opción 8 se observa en la Figura 5-33. Se aprecia una mayor variación del porcentaje en los caudales de inundación para la cámara 21342C, con un porcentaje de reducción de 100 %. En 8 de 10 cámaras evaluadas se presentaron porcentajes de atenuación por encima de 40%, en las cámaras 21342C, 21343C, 21334C, 21339C, 21549C, 21337C, 21338C y 21548C. Por otra parte, se observan resultados que muestran porcentajes de atenuación entre 30 y 40% en las cámaras 21335C y 21336C, reflejando en términos generales, un buen comportamiento para la opción 8 en la zona 3.

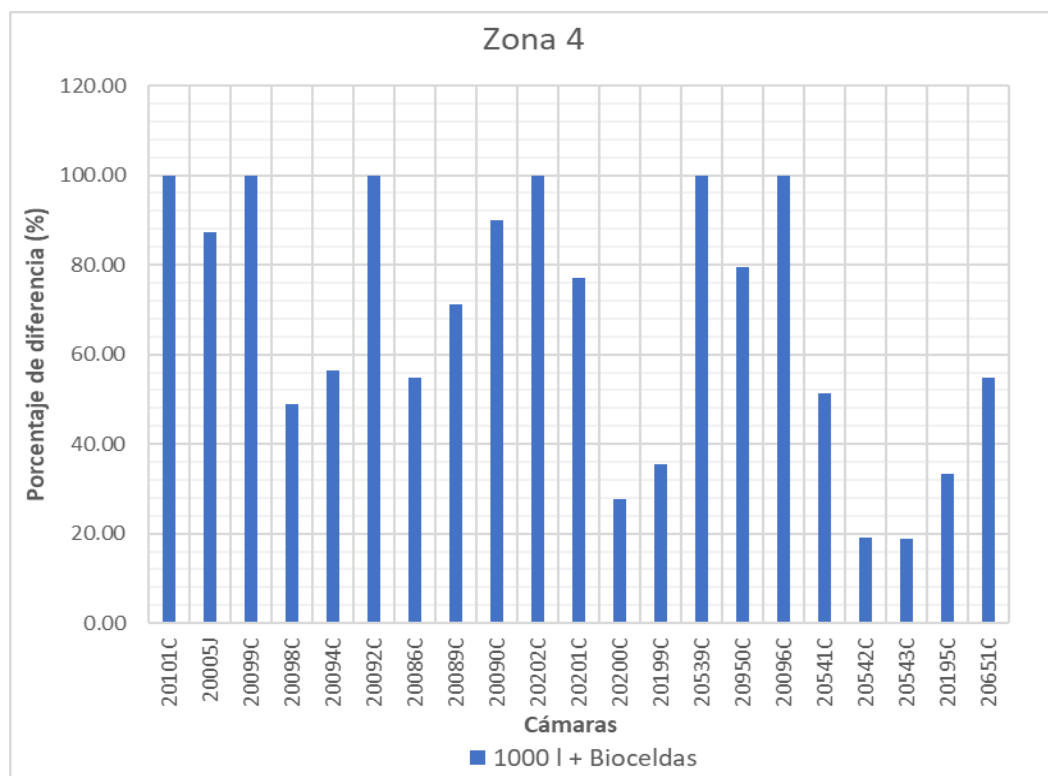


**Figura 5-33:** Variación en porcentaje de caudales de inundación de la opción 8 con respecto a la simulación sin SUDS en zona 3

#### Zona 4

Para la zona 4, la variación en porcentaje de los caudales de inundación aplicando la opción 8 se observa en la Figura 5-34. En la presente zona, se aprecian reducciones de caudales de inundación del 100 % en las cámaras 20101C, 20099C, 20092C, 20202C, 20539C y 20096C, mostrando buen resultado en comparación con las otras 3 zonas. En 19 de las 21 cámaras evaluadas en la zona 4 se presentaron atenuaciones con porcentajes superiores al 25 %. Para el caso de las cámaras 20542C y 20543C, el porcentaje de diferencia de inundación fue de 19.08 y 18.82 %.

En general, igual que para las otras zonas, el resultado para la opción 8 es favorable ya que se consigue un decremento significativo en los caudales de inundación y no se observan resultados negativos, lo que permite concluir que la aplicación de las celdas de bioretención junto con los barriles de 1000 litros en 2 niveles, logran atenuar cámaras donde anteriormente se presentaban incrementos de caudales de inundación.



**Figura 5-34:** Variación en porcentaje de caudales de inundación de la opción 8 con respecto a la simulación sin SUDS en zona 4

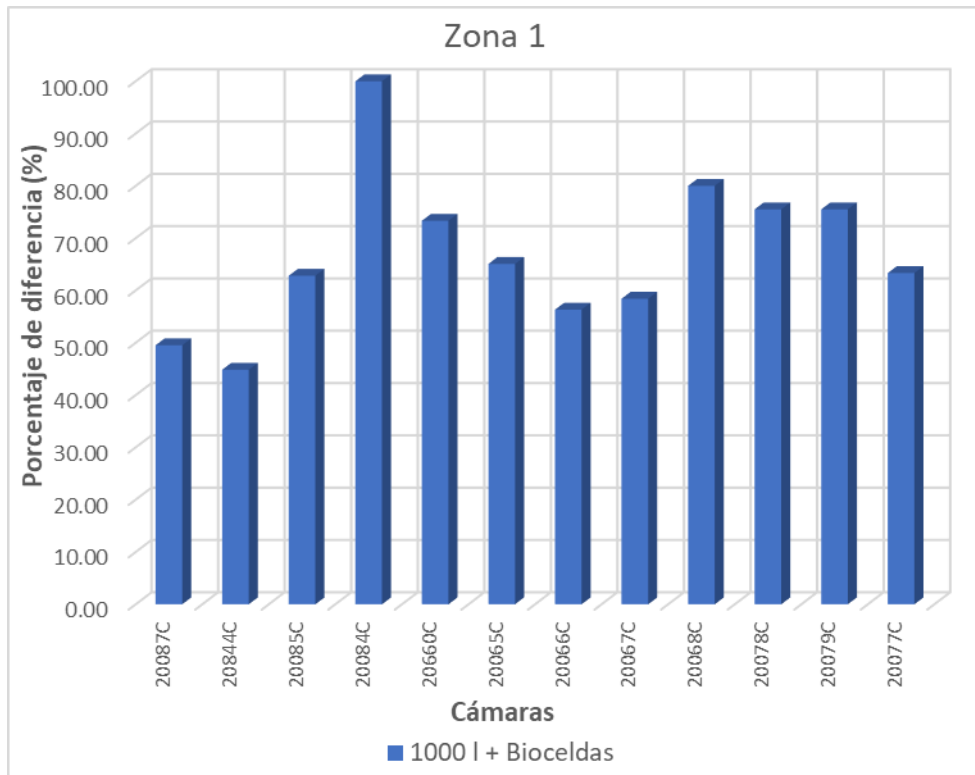
▪ **Análisis de los volúmenes de inundación para la opción 8 aplicada en las zonas críticas**

Con el propósito de conocer la variación en el porcentaje del volumen para la opción 8, frente a la opción sin SUDS, a continuación, se presentan las ilustraciones para cada una de las cuatro zonas críticas, identificadas en la Figura 5-35, Figura 5-36, Figura 5-37 y Figura 5-38.

**Zona 1**

De acuerdo con la Figura 5-35, la opción 8 muestra disminuciones en los volúmenes de inundación entre 44.85 y 100 %, resultados obtenidos en la cámara 20844C y 20084C respectivamente. Con la simulación de la opción 8, se observaron disminuciones en el volumen por encima del 50% para las cámaras 20085C, 20084C, 20660C, 20065C, 20066C, 20067C, 20068C, 20078C, 20079C y 20077C, lo que representa muy buena funcionalidad al aplicar los barriles de 1000 litros en 2 niveles con la alternativa de bioceldas en las anteriores cámaras. En resumen, el efecto sobre los volúmenes de

inundación tiene una relación directa con los caudales punta mostrados anteriormente ya que se logra observar reducciones considerables para cada una de las cámaras evaluadas. En conclusión, la opción 8 muestra resultados satisfactorios, consiguiendo decrementos del 67% en promedio para la zona 1.

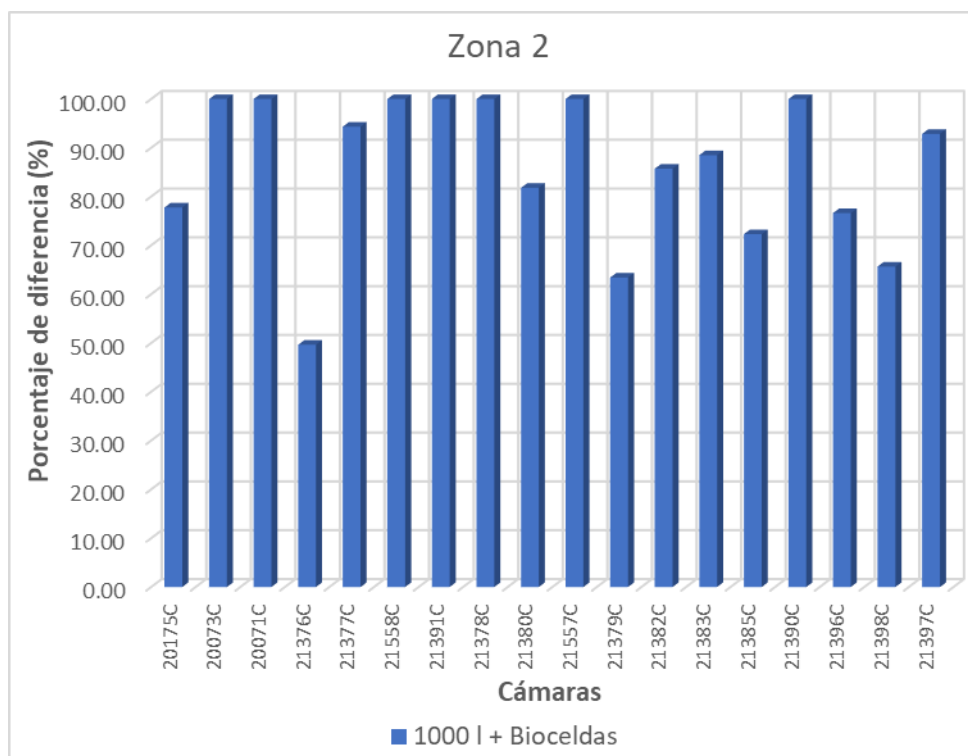


**Figura 5-35:** Variación en porcentaje del volumen de inundación entre la simulación con opción 8 y la simulación sin SUDS para la zona 1

## Zona 2

Según la Figura 5-36, con la aplicación de la opción 8, se presentan disminuciones en los volúmenes de inundación entre 49.65 % para la cámara 21376C y del 100 % en las cámaras 20073C, 20071C, 21558C, 21391C, 21378C, 21557C y 21390C. La opción 8, mostró disminuciones en el volumen por encima del 49.65 % para las cámaras 20175C, 21377C, 21380C, 21379C, 21382C, 21383C, 21385C, 21396C, 21398C y 21397C, lo que representa muy buen comportamiento al aplicar la alternativa de barriles de 1000 litros en 2 niveles junto con la alternativa de bioceldas para las anteriores cámaras. En resumen e igual que en la zona 1, el efecto sobre los volúmenes de inundación tiene una relación directa con los caudales punta mostrados anteriormente ya que se logran observar

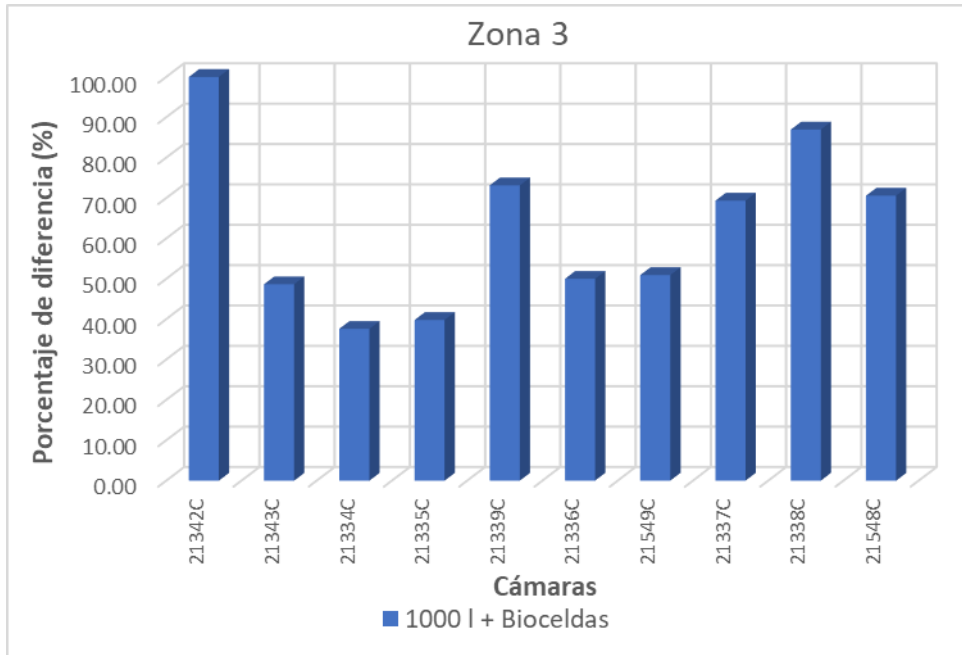
reducciones considerables para cada una de las cámaras evaluadas. Según lo anterior, la opción 8 muestra resultados satisfactorios, consiguiendo decrementos del 86.04 % en promedio para la zona 2.



**Figura 5-36:** Variación en porcentaje del volumen de inundación entre la simulación con opción 8 y la simulación sin SUDS para la zona 2

### Zona 3

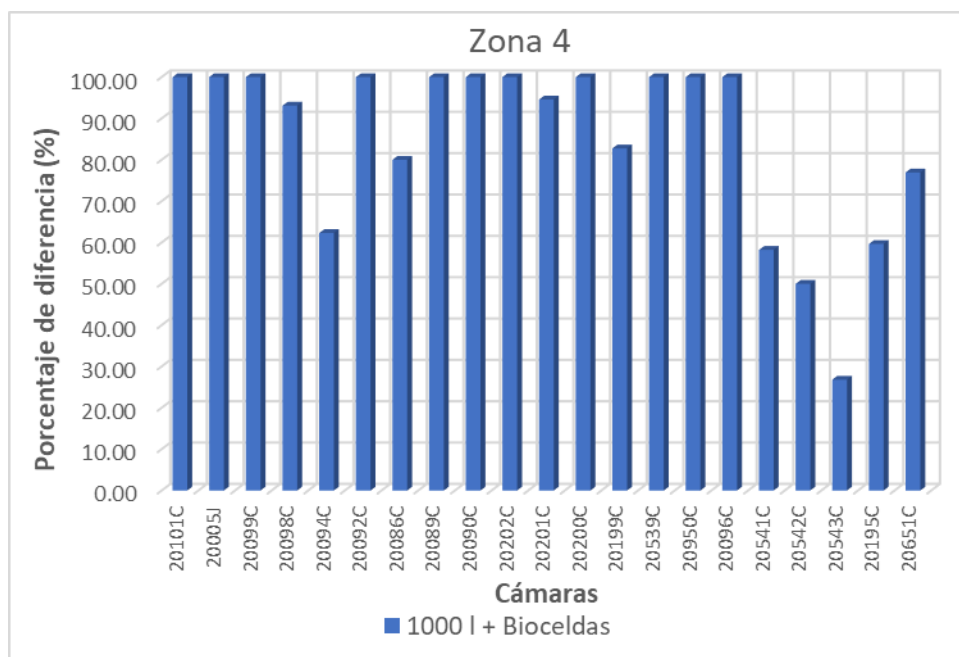
Para el caso de la zona 3 y según la Figura 5-37, se aprecian disminuciones en los volúmenes de inundación entre 37.6 y 100 %, resultados obtenidos en la cámara 21334C y 21342C respectivamente. La opción 8 mostró disminuciones en el volumen por encima del 37.6% para las cámaras 21343C, 21335C, 21339C, 21336C, 21549C, 21337C, 21338C y 21548C, lo que representa un comportamiento satisfactorio al aplicar la opción 8 las anteriores cámaras. Como se aprecia en el análisis y en menor medida que la zona 2, se logran atenuar los volúmenes mediante la aplicación de la opción 8, consiguiendo disminuciones del 62.7 % en promedio.



**Figura 5-37:** Variación en porcentaje del volumen de inundación entre la simulación con opción 8 y la simulación sin SUDS para la zona 3

#### Zona 4

Según la Figura 5-38, para el caso de la zona 4, las cámaras 20101C, 20005J, 20099C, 20092C, 20089C, 20090C, 20202C, 20200C, 20539C, 20950C, 20096C presentaron disminución del volumen de inundación igual al 100 %. Por otro lado, las cámaras 20098C, 20094C, 20086C, 20201C, 20199C, 20541C, 20542C, 20195C y 20651C presentaron reducción del volumen por encima del 50%. Lo anterior, muestra muy buena funcionalidad al aplicar la opción 8 como en las anteriores cámaras. Por otro lado, la cámara 20543 presentó un porcentaje de diferencia de 26.82 %, correspondiendo a la variación más baja de las 21 cámaras evaluadas en la zona 4. De acuerdo a lo anterior, se puede observar que la aplicación de la opción 8 presenta decrementos del 84.97 % en promedio.



**Figura 5-38:** Variación en porcentaje del volumen de inundación entre la simulación con opción 8 y la simulación sin SUDS para la zona 4

- **Relación de tiempos y volúmenes de inundación con opción 8 para zonas críticas**

En la Tabla 5-15, se puede apreciar el comportamiento resumido de los tiempos y volúmenes de inundación, asociados al número de cámaras que se inundan según el lapso determinado para las simulaciones realizadas aplicando la opción 8 y la opción sin SUDS. Como en las anteriores evaluaciones, el tiempo está en intervalos de 10 minutos iniciando desde el minuto 0 hasta los 50 minutos.

**Tabla 5-15:** Relación de tiempos y volúmenes de inundación para las opción 8**Zona 1**

Periodo (Min)	Opción sin SUDS		Opción 8: 1000 l + Bioceldas	
	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)
0-10	1	0.007	2	0.008
10-20	1	0.030	4	0.098
20-30	2	0.141	5	0.158
30-40	3	0.296	1	0.054
40-50	5	0.345	0	0.000
>50	0	0.000	0	0.000
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>0.819</b>	<b>12</b>	<b>0.318</b>

**Zona 2**

Periodo (Min)	Opción sin SUDS		Opción 8: 1000 l + Bioceldas	
	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)
0-10	1	0.003	14	0.072
10-20	5	0.204	4	0.154
20-30	11	0.839	0	0.000
30-40	1	0.065	0	0.000
40-50	0	0.000	0	0.000
>50	0	0.000	0	0.000
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>1.111</b>	<b>18</b>	<b>0.226</b>

**Zona 3**

Periodo (Min)	Opción sin SUDS		Opción 8: 1000 l + Bioceldas	
	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)
0-10	1	0.025	1	0
10-20	0	0	2	0.024
20-30	1	0.067	3	0.067
30-40	0	0	4	0.233
40-50	3	0.154	0	0
>50	5	0.479	0	0
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>0.725</b>	<b>10</b>	<b>0.324</b>

**Zona 4**

Periodo (Min)	Opción sin SUDS		Opción 8: 1000 l + Bioceldas	
	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)	Número de cámaras inundadas (Un)	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> l)
0-10	2	0.009	14	0.009
10-20	7	0.168	3	0.041
20-30	5	0.141	2	0.107
30-40	3	0.145	0	0
40-50	2	0.26	0	0
>50	2	0.342	2	0.222
<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>1.065</b>	<b>21</b>	<b>0.379</b>



---

#### ▪ **Análisis de tiempos y volúmenes de inundación para la opción 8**

De acuerdo con lo observado en la Tabla 5-15, para la opción 8, relacionada con la aplicación de barriles de 1000 litros y celdas de bioretención, se aprecia una reducción considerable del volumen de inundación en cada una de las 4 zonas.

Para la zona 1, en la opción 8 se observa un volumen total de 318000 litros, donde el mayor volumen según los periodos considerados, se presentó en el tiempo de inundación comprendido entre los 20 y 30 minutos, con un valor de 158000 litros y 2 cámaras inundadas. Por otro lado, se observa a partir de los 40 minutos no se presentaron volúmenes de inundación.

Con relación a la zona 2, la opción 8 presenta un volumen de inundación de 226000 litros, comparada con la opción sin SUDS donde se obtuvo un volumen de 1111000 litros, apreciándose una alta disminución. Por otro lado, se observa que a partir de los 20 minutos no se presentaron volúmenes de inundación.

En la zona 3, la opción 8 presentó un volumen de inundación de 324000 litros, por su parte la opción sin SUDS presentó un volumen de 725000 litros. Por otro lado, se observan disminuciones en el número de cámaras inundadas, llegando a cero unidades en 2 de los 6 periodos de tiempo analizados.

En la zona 4, la opción 8 presentó un volumen de inundación de 379000 litros y la opción sin SUDS un volumen de 1065000 litros. El mayor volumen según los periodos considerados, se observó en los tiempos mayores a 50 minutos, con un volumen de 222000 litros y 2 cámaras inundadas. Por otro lado, la opción sin SUDS presentó en su mayor volumen un valor de 342000 litros, igualmente para tiempos de inundación mayores a 50 minutos, con 2 cámaras inundadas.

Igual que en las 3 zonas anteriores, la zona 4, logra presentar una alta disminución en los volúmenes de inundación, donde se aprecian reducciones totales, a partir de los 30 minutos.

## **6. Conclusiones**

### **6.1 Propuesta y definición de alternativas SUDS**

Partiendo de la literatura y de estudios realizados en la cuenca evaluada, se presentaron opciones de alternativas de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que se ajustaran a las condiciones propias de la zona, teniendo presente las características de atenuación, para extender la duración de la escorrentía y la captura de esta para su almacenamiento temporal en el sitio donde se origina.

Después de haber evaluado las ventajas y desventajas de las alternativas de SUDS consideradas, se determinó la aplicación de los depósitos de lluvia y las bioceldas para la cuenca Palogrande, al concluir que corresponde a la tipología con mejor comportamiento para altos flujos de escorrentía y por no requerir áreas representativas para su implementación, ni interferir en procesos de infiltración de los suelos que conlleven a la presencia de deslizamientos en zonas susceptibles con altas pendientes. Es así como los barriles de lluvia se determinaron como alternativas para recoger escorrentía durante los eventos de lluvia, liberándola o almacenándola para su reutilización durante los periodos secos, permitiendo almacenar en sitio el agua lluvia y transportarla directamente hacia la red de alcantarillado.

Por otro lado, se buscó complementar las opciones de barriles de lluvia con una alternativa adicional, que contribuyera a la atenuación y permitiera un impacto positivo sobre los planteamientos urbanísticos de diferentes zonas en las subcuencas donde se implementarían. Es así como se consideraron las celdas de bioretención como alternativa complementaria para la cuenca de la quebrada Palogrande.

## 6.2 Evaluación de alternativas SUDS mediante SWMM

Teniendo presente la disponibilidad de información a partir de investigaciones realizadas en la cuenca Palogrande, entre estas, la desarrollada por (Rey Valencia, 2019), en la zona de estudio, se consideró mejorar el nivel de discretización de la cuenca e implementar mayor cantidad de SUDS en esta, por tal razón, se adelantó nuevamente la revisión y se discretizó aún más para aplicar los barriles de lluvia en la zona alta de la cuenca. Una vez discretizada nuevamente la cuenca, se procedió a simular el modelo hidrodinámico con SWMM, de esta forma conocer el comportamiento de la cuenca antes de aplicar los SUDS. Al correr el modelo y conocer las condiciones hidráulicas, se determinó el minuto 30 como momento crítico, identificándose para este tiempo 4 zonas críticas, en las que se determinaron caudales máximos de inundación, tiempos de inundación y volúmenes de inundación.

### 6.2.1 Escenarios para evaluación de alternativas

Para adelantar la evaluación de alternativas, se plantearon 3 escenarios con varias opciones de barriles de lluvia que correspondieron a diferentes tipos de tanques comerciales, tal como se muestra a continuación:

#### Escenario 1

Inicialmente se adelantaron las simulaciones para 5 tipos de depósitos con capacidades de 500, 600, 1000, 1100 y 2000 litros (opción 1 a 5), incorporando los parámetros de cada una de estas opciones teniendo presente una sola unidad de tanque por techo de vivienda o edificación en el modelo hidrodinámico con el fin de realizar la evaluación hidráulica entre el modelo sin SUDS y el modelo con la aplicación de las 5 opciones mencionadas.

Al realizar la evaluación hidráulica y comparar porcentajes de caudal de inundación entre el modelo sin SUDS y el modelo con las opciones de barriles 1 a 5, en las 4 zonas críticas, se puede concluir que en cada una de las zonas donde fueron aplicadas, se observan algunos resultados negativos, mostrando un comportamiento diferente al esperado con la aplicación de este tipo de SUDS. Sin embargo, para los otros criterios considerados, se observan diferencias porcentuales altas que pueden representar un comportamiento satisfactorio, como es el caso de la zona 1, donde se aprecia una mayor variación del

porcentaje en los caudales de inundación con valores de atenuación entre 22.32 y 34.60 %, para la opción de barriles de 2000 litros.

## **Escenario 2**

Como segundo escenario, se consideraron 2 depósitos de lluvia con capacidades de 1000 y 2000 litros (opción 6 y 7), en dos niveles y un nivel respectivamente. A diferencia del primer escenario, se aumentó el número de unidades, según el área de cada techo, variando el número de barriles en aquellas viviendas o edificaciones donde se contaba con mayor área según la clasificación adelantada.

Para el caso de las opciones 6 y 7, se presentaron diferencias de caudales de inundación con un mejor comportamiento para las 4 zonas evaluadas, aunque persistieron resultados negativos, se pudo observar que en la totalidad de las zonas hubo resultados que alcanzaron el 100% de atenuación. Tanto la opción 6 como la opción 7 mostraron resultados satisfactorios, con mejores porcentajes de reducción en la zona 2 y 4.

Es notable que el comportamiento tanto para la opción de 1000 litros en 2 niveles como la opción de 2000 litros en un solo nivel, resulta ser muy similar, lo que demuestra que ambas alternativas corresponden a buenas soluciones de mitigación de caudales punta.

## **Escenario 3**

El tercer escenario consistió en la simulación de barriles de lluvia con capacidad de 1000 litros en 2 niveles y celdas de bioretención como alternativa complementaria.

En la aplicación de la opción 8 (barriles de 1000 litros en 2 niveles y celdas de bioretención), las celdas de bioretención se configuraron en módulos de 3.0 x 0.8 metros, según la longitud considerada para cada una de las subcuencas donde se implementó la alternativa, captando el flujo de media calzada de las vías en el área de influencia.

Una vez realizada la evaluación, no se observó una variación considerable en la diferencia de caudales de inundación, cuyos resultados fueron muy similares en lo referente a la atenuación en las 4 zonas evaluadas, lo que permite concluir que los depósitos de lluvia logran atenuar todo lo que se puede atenuar por techo, de manera que las bioceldas ya no pueden atenuar mucho más.

### **6.2.2 Evaluación de tiempos y volúmenes**

Al realizar la comparación del tiempo de inundación entre las opciones de barriles de lluvia y la simulación sin SUDS, se observa un comportamiento satisfactorio para las opciones evaluadas, presentando disminuciones de los tiempos hasta del 100% para las opciones 6 y 7, con mejores resultados en las zonas 2 y 4.

En cuanto a los resultados observados en los volúmenes de inundación, las opciones 6 y 7, presentaron mayores variaciones comparadas con las primeras 5 opciones de barriles, alcanzando porcentajes de disminución de dichos volúmenes de hasta el 100%. En promedio los porcentajes de reducción para las opciones 6 y 7 estuvieron por encima del 83.58 % y 79.47 % respectivamente, mostrando que el efecto sobre los volúmenes de inundación tiene una relación directa con los caudales punta mostrados anteriormente ya que se logra observar reducciones considerables en cada una de las zonas evaluadas.

Según lo anterior, se puede observar que la opción 6 para barriles de 1000 litros en 2 niveles presenta un mejor comportamiento en cuanto a retardo en el tiempo para alcanzar la inundación y disminución de los volúmenes de inundación en comparación con las 5 primeras opciones de barriles simuladas. Por su parte, al comparar los resultados de la opción 7 resulta ser muy similar lo que permite concluir que ambas opciones tienen un buen comportamiento.

### **6.2.3 Elección mejor escenario y alternativa**

Se seleccionaron los depósitos de lluvia para evaluar el presente trabajo por su economía, y facilidad de ubicación, sin embargo, en las primeras 5 opciones no se obtuvieron los resultados esperados ya que no se logra disminuir los problemas de inundación de manera significativa. Al evaluar las opciones 6 y 7, consideradas en el segundo escenario, se logra apreciar un mejor comportamiento de los depósitos incrementando su número, Por tanto, esta investigación permitió utilizar todas las opciones disponibles desde el punto de vista comercial para la ciudad de Manizales. Lo anterior permite concluir que los depósitos de lluvia corresponden a una alternativa viable para la mitigación de las inundaciones en zonas de alta montaña solo si se utilizan en gran cantidad.

## 6.3 Recomendaciones

Se recomienda adelantar modelaciones hidrodinámicas en cuencas diferentes a las del presente estudio, con el fin de tener puntos de comparación que permitan conocer el comportamiento hidrológico e hidráulico para disponer de más alternativas a las problemáticas de inundación pluvial en la ciudad de Manizales.

Se sugiere adelantar más investigaciones relacionadas con las evaluaciones de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible para mitigar inundaciones pluviales aplicando modelaciones en serie con el fin de profundizar en las evaluaciones para conocer el comportamiento hidrodinámico en cuencas urbanas.

Se sugiere también desarrollar estudios de profundización e investigación en interacción con entidades gubernamentales, que permitan considerar alternativas de SUDS en los diferentes planteamientos urbanísticos de la ciudad, acogiéndose a los planes de desarrollo que se tengan las diferentes administraciones municipales o departamentales.

## **Anexos:**

Anexo 1: Análisis hidráulico Modelación hidrodinámica cuenca Palogrande sin SUDS, agosto de 2020.

Anexo 2: Análisis hidráulico Modelación hidrodinámica cuenca Palogrande SUDS – 500 l, 600 l, 1000 l, 1100 l, 2000 l. agosto de 2020.

Anexo 3: Análisis hidráulico Modelación hidrodinámica cuenca Palogrande SUDS –1000 l en 2 niveles y 2000 l en 1 nivel, incrementado número de unidades según áreas de techos. octubre de 2020.





## Bibliografía

ACUAVIVA. (2019). Manual técnico.

Aguas de Manizales. (2014). Información de la red de alcantarillado combinado de la Manizales en base Sistemas de Información Geográfica, 2014. Manizales.

Aguas de Manizales. (2019). Información de la red de alcantarillado combinado de la Manizales en base Sistemas de Información Geográfica, 2019.

Agudelo R, L. Y., & Duque G, J. F. (2018). *Ladera sostenible, integración Socio Territorial para el Desarrollo Urbano en Laderas*. Universidad Autónoma de Manizales.

Baker, L. A. (2009). The Water Environment of Cities. *Springer*. <http://doi.org/10.1007/978-0-387-84891-4>

Barbosa, A. E., Fernandes, J. N., & David, L. M. (2012). Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water Research*, 46(20), 6787–6798. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.029>

Baró Suarez, J. E., Díaz Delgado, C., Calderón Aragón, G., Esteller Alberich, M. V., & Cadena Vargas, E. (2011). Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12(1), 19. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531974013>

Cabezas Suárez, Y. C., & Zambrano Nájera, J. (2016). Evaluación del Impacto de los Cambios de Usos del Suelo sobre la Hidrología de Cuencas Urbanas Caso de aplicación cuenca San Luis. In *7o Encuentro de Semilleros de Investigación - Nodo Caldas Red Regional de Semilleros de Investigación –RREDSI-*. Manizales.

CASQA, C. S. Q. A. (2017). Removing Barriers to Low Impact Development (LID).

Chocat, B., Ashley, R., Marsalek, J., Matos, M. R., Rauche, W., Schilling, W., & Urbonas, B. (2007). Toward the Sustainable Management of Urban Storm-Water. *SAGE Discipline Hubs*.

CIIA. (2015). Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C. Bogotá D.C.: Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, Universidad de los Andes.

- Concejo de Bogotá. (2009a). Acuerdo 391 de 2009.
- Concejo de Bogotá. (2009b). Acuerdo 418 de 2009.
- EAAB. (2018). Criterios para diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Bogotá D.C.
- ESRI. (2014). ArcGIS-Arcmap. California, CA, USA: ESRI. Retrieved from <http://desktop.arcgis.com/es/desktop/>
- ETERNIT. (2016). Manual técnico. Retrieved from <https://www.etermit.com.co/documents/32456/170778/FICHA+TECNICA+TANQUES+PLASTICOS.pdf/7ce436b6-e3ca-4580-8368-9c26dbab10ac>
- Giraldo, M. (2016). Caracterización de las propiedades del suelo de la cuenca San Luis en la ciudad de Manizales - Caldas. Manizales.
- Gómez Valentín, M. (2007). Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0.
- Hromadka, V. T., & Whitley, R. J. (1989). Stochastic Integral Equations and Rainfall-Runoff Models. Retrieved from <http://doi.org/10.1007/978-3-642-49309-6>
- Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). Ciudades e Inundaciones Guía para la Gestión Integrada del Riesgo de Inundaciones en Ciudades en el Siglo 21, 61.
- Jiménez Ariza, S. L., Martínez, J. A., Muñoz, A. F., Quijano, J. P., Rodríguez, J. P., Camacho, L. A., & Díaz-Granados, M. (2019). A multicriteria planning framework to locate and select sustainable urban drainage systems (SUDS) in consolidated urban areas. *Sustainability (Switzerland)*, 11(8), 33. <http://doi.org/10.3390/su11082312>
- López, L. (2017). Aforos líquidos y sólidos en la Quebrada San Luis. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.
- Louisiana Public Health Institute, Bayou Land RC&D, & Geosyntec Consultants. (2010). A Stormwater Best Management Practices Guide for Orleans and Jefferson Parishes.
- Martínez Acosta, J. A. (2017). *Metodología para determinar el potencial de implementación de Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible (SUDS) en áreas residenciales, a partir de análisis de Sistemas de Información Geográfica (SIG). caso de estudio Bogotá D.C., Colombia*. Universidad de los Andes.
- Medina Piza, D. L., Aguilar Rojas, L. Y., & Calderon Gomez, A. (2018). *Análisis comparativo de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) caso de estudio carrera 4 y carrera 5 entre calles 68 y 71, sector Chapinero Alto, Bogotá, Colombia*. Universidad Católica de Colombia.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2010). NSR-10.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2017). Resolución 330 de 2017.
- QGIS development team. (2017). Qgis 2.18 Quantum GIS Geographic Information System,

Open Source Geospatial Foundation Project.

Ragscorp. (2018). Manual técnico.

Rey Valencia, D. M. (2015). Comparación entre modelos empíricos y modelos de base física para cuencas urbana de media y alta montaña. Caso de estudio Cuenca Experimental San Luis- Palogrande. Universidad Nacional de Colombia, Manizales.

Rey Valencia, D. M. (2019). *Propuesta de Sistema de Drenaje Urbano Sostenible para cuencas de montaña con alta pendiente*. Universidad Nacional de Colombia.

Rey Valencia, D. M., & Zambrano Nájera, J. D. C. (2017). Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palogrande. *Revista UIS Ingenierías*, 13(1), 115–126. <http://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018011>

Riverside County Flood Control and Water Conservation District. (2011). Design Handbook for Low Impact Development Best Management Practices. Riverside, CA.

Rossmann, L. A. (2015). Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.1. United States Environment Protection Agency. Cincinnati: EPA.

Rossmann, L. A. (2016). Storm Water Management Model Reference Manual Volume III– Water Quality. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. Washington, DC.

Rossmann, L. a., & Huber, W. (2016). Storm Water Management Model Reference Manual Volume I–Hydrology (Revised). *US Environmental Protection Agency: Cincinnati, OH, USA*. Cincinnati. Retrieved from <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockkey=P100NYRA.txt>

ROTOPLAS. (2012). Manual técnico. Retrieved from <http://www.rotoplast.com.co/Rotomoldeoencolombia/linea-tanques/>

Seco, I. (2018). Sistemas de drenaje urbano sostenible SUDs (SustainableUrban Drainage).

Secretaría Distrital de Ambiente. (2011a). Guía de Techos Verdes en la ciudad de Bogotá.

Secretaría Distrital de Ambiente. (2011b). Resolución 6423 de 2011.

Secretaría Distrital de Ambiente. (2011c). Resolución 6523 de 2011.

Shaver, E., Horner, R., Skupien, J., May, C., & Ridley, G. (2007). *Fundamentals of Urban Runoff Management* (2 ed.).

SUAREZ, J. N. (2008). Propuesta metodológica para el estudio del proceso lluvia escorrentía en cuencas urbanas de ciudades de media montaña andina. Caso de estudio: cuenca experimental quebrada San Luís. Manizales - Caldas. Manizales.

Toronto and Region Conservation Authority. (2010). Low Impact Development Stormwater BMP Fact Sheets. Toronto, Canada.

Tovar Hernández, I. M., & Zambrano Nájera, J. (2014). Monitoreo de variables ambientales

en cuencas experimentales urbanas. Caso cuenca San Luis. Encuentro Internacional de Grupos de Investigación. Editorial UNIMAR, Universidad Mariana.

Tsihrintzis, V. A., & Hamid, R. (2001). Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM. *Hydrological Processes*. Retrieved from [http://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199802\)12:2%3C311::AID-HYP579%3E3.0.CO;2-R](http://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199802)12:2%3C311::AID-HYP579%3E3.0.CO;2-R)

USDA-ARS. (2008). Sitio Web STEWARDS (Sustaining The Earth's Watersheds – Agricultural Research Database System).

Valbuena Villalonga, M. (2016). *Rehabilitación de redes de alcantarillado mediante técnicas LID, usando SWMM5 en un caso real* (Distribuid). Barcelona: Distribuidora Alfambra de Papelería, S.L. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/99124?show=full>

Vélez Upegui, J. J., & Botero Gutiérrez, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales (Estimation of the time of concentration and the lag time at San Luis creek basin, Manizales).

Virginia Department Of Transportation. (2013). BMP Design Manual of Practice. Virginia.

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). *The SUDS manual*. Ciria. London: CIRIA. <http://doi.org/London C697>

Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). *The SuDS Manual*, CIRIA.

Zambrano Nájera, J. (2015). *Estimación de la producción y transporte de sedimentos en cuencas urbanas pequeñas a escala de evento mediante un modelo de base física basado en SIG*. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONA TECH.